

**REGINA DO ROCIO DE ANDRADE**

**FOTOGRAMETRIA DINÂMICA:  
Determinação Fotogramétrica Digital de Deformações  
em Elementos Estruturais de Madeira**

Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do Título de “Doutor em Ciências Florestais”.

Orientador: Prof. Dr. Flávio Felipe  
Kirchner.

**CURITIBA  
2005**

**REGINA DO ROCIO DE ANDRADE**

**FOTOGRAMETRIA DINÂMICA:  
Determinação Fotogramétrica Digital de Deformações  
em Elementos Estruturais de Madeira**

**COMITÊ DE ORIENTAÇÃO**

Orientador: Prof. Dr. Flávio Felipe Kirchner

Co-orientador: Prof. Dr. Jorge Luís Matos

**CURITIBA  
2005**

PÁGINA RESERVADA PARA O TERMO DE APROVAÇÃO

*O sucesso só vem antes do trabalho, no dicionário.*

Albert Einstein

## **DEDICATÓRIA**

Ao Claudemir, meu esposo, aos meus filhos Alessandro  
Johann, Rebecca Caroline e Maria Vitória e aos meus pais José e Maria.

**DEDICO**

## **AGRADECIMENTOS**

A todas as pessoas, instituições e empresas que contribuíram para a realização deste trabalho. Especialmente:

Ao Prof. Dr. Flávio Felipe Kirchner, pela orientação, apoio e incentivo;

Ao meu co-orientador, Prof. Dr. Jorge Luís Matos, pela orientação, apoio e incentivo;

À Eliane Maria Stroparo, chefe da Biblioteca “Plínio Alves Monteiro Tourinho”, pela revisão das normas para tese.

Aos amigos e colegas do Curso;

À empresa Geokosmos, representada pelo Prof. Dr. José Bittencourt de Andrade, por disponibilizar os programas usados neste trabalho de tese.

Ao Reynaldo Bittencourt Souto, pela contribuição.

Ao Marcelo Cardoso Gonçalves, pela contribuição.

Ao mestrando Daniel Chies, pela condução dos ensaios, no Laboratório de Tecnologia da madeira da UFPR.

Aos funcionários da secretaria de Pós-Graduação da Engenharia Florestal e da FUPEF.

Ao CNPQ pelo apoio financeiro durante os primeiros seis meses do Curso;

Ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal da Universidade Federal do Paraná, por possibilitar a realização deste Curso e o presente trabalho;

Aos meus familiares, em especial meu esposo e filhos, pela compreensão, incentivo, paciência e estímulo, sem o qual certamente não seria possível realizar este trabalho;

Aos meus pais, José e Maria, que foram sempre meus mestres, que cuidaram da minha família e pelo incentivo e apoio.

Às minha irmãs Cristina e Francine pelo estímulo, e ajuda especial de Cristina na montagem da apresentação.

## **BIOGRAFIA**

**REGINA DO ROCIO DE ANDRADE**, filha de José Bittencourt de Andrade e Maria da Luz de Andrade, natural de Curitiba, Estado do Paraná, onde nasceu em 15 de novembro de 1964.

Iniciou os estudos na pré - escola Centro Educacional Guaíra, onde cursou até a 4ª série do primeiro grau, concluindo no ano de 1974.

Em setembro de 1974, mudou-se para os Estados Unidos da América, onde cursou da 5ª até a 7ª série, nas seguintes escolas: Crambrook Elementary School, Kingswood Elementary School e Indionala Junior High School.

Em 1978, concluiu o primeiro grau no Colégio Positivo Jr., em Curitiba. Em 1981 concluiu o segundo grau no Colégio Positivo.

Em 1988 e 1989, fez estágio na Empresa Geokosmos Geodésia e Consultoria Ltda.

Em 1990 graduou-se em Engenharia Cartográfica pela Universidade Federal do Paraná.

Em 1990, ingressou na Empresa Geokosmos Geodésia e Consultoria Ltda. como engenheiro responsável técnico.

Em abril 1999, ingressou no Curso de Pós - Graduação em Engenharia Florestal, Área de Concentração de Manejo Florestal, da Universidade Federal do Paraná, concluindo o Mestrado em fevereiro de 2001.

Em fevereiro de 2000, começou a ministrar aulas na Disciplina de Fotogrametria e Fotointerpretação Florestal, no Curso de Graduação em Engenharia Florestal, até junho de 2004.



Em março de 2001, ingressou no Curso de Pós- Graduação, Área de Concentração em Manejo Florestal, da Universidade Federal do Paraná, dando início ao programa de Doutorado.

Em agosto de 2001, ingressou na Universidade Federal do Paraná, mediante Concurso Público de títulos e Provas, como docente das disciplinas de Fotogrametria e Topografia, no departamento de Geomática, onde ministrou aulas até setembro de 2003.





## RESUMO

Esta tese de doutorado visa o desenvolvimento de tecnologia para a medição dinâmica de deformações em elementos estruturais de madeira. Medição dinâmica deve ser entendido como o processo para realizar mensurações acuradas de coordenadas de pontos de um objeto em processo de deformação ou de movimento. O estudo concentra-se em peças de madeira solicitadas por carregamento que provoque flexão. As deformações são determinadas em alvos espalhados pela peça de modo a permitir outros estudos. Por isso, a sua distribuição na superfície da peça foi objeto de minucioso planejamento.

Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Tecnologia da Madeira, no Centro de Estudos Florestais e da Madeira da Universidade Federal do Paraná, onde as imagens das peças foram tomadas com câmera digital. Mantendo os mesmos parâmetros fotogramétricos, um painel com um conjunto de alvos também foi fotografado.

As coordenadas dos alvos nos dois conjuntos de imagens foram processados simultaneamente pelo Bundle Method, tendo como parâmetros comuns os de calibração da câmera. Desta forma, num método que **Mensuração de Processos Dinâmicos com Calibração Instrumental**, as coordenadas de alvos em movimento foram mensurados num referencial espacial ao mesmo tempo em que a câmera era calibrada.

Existe um método denominado “On Job Calibration”, onde, numa aerotriangulação, são introduzidos parâmetros adicionais, definidores da calibração da câmera e outras fontes de erros sistemáticos, como incógnitas, em mensurações estáticas. É importante notar que aqui, os dados para as mensurações de coordenadas são independentes dos dados para calibrar a câmera, tanto em tempo quanto em espaço. São tais dados, entretanto processados simultaneamente, baseando-se no pressuposto de que os parâmetros de calibração são os mesmos nos dois conjuntos de dados.

Calibrar uma câmera significa, em termos práticos, determinar o valor numérico da distância principal; das coordenadas fotogramétricas do ponto principal; dos parâmetros das curvas de distorção radial simétrica e da distorção descentrada da objetiva, bem como de estatísticas que indiquem a qualidade dos resultados obtidos.

A calibração da câmera é a garantia da eliminação de erros sistemáticos instrumentais no processo de mensuração.

A exatidão alcançada nas experiências mostrou que a metodologia foi perfeitamente adequada para as exigências requeridas nesses tipos de ensaio, ou seja, na determinação precisa do deslocamento de alvos colados em locais escolhidos no corpo de provas.

Palavras chave: Fotogrametria Digital, Fotogrametria Dinâmica, Materias-Deformações e Calibração.

## ABSTRACT

This PhD Dissertation meant to develop a technology to perform dynamic measurements of deformations in wood structural elements. For dynamic measurement one must understand by the process of taking accurate measurements of points coordinates of an object in process of deformation or movement. The study was concentrated in wood structural pieces submitted to a load provoking flexion deformation. These deformations are to be measured in targets spread along the sample of wood board in a way to allow further studies. For this reason the distribution of the targets was subject of detailed planning.

All the experiments were realized in the Laboratory of Wood Technology of the Forest and Wood Center of Science, of the Universidade Federal do Paraná, where the images were taken with a digital camera. Keeping the same photogrammetric parameters a panel with a set of targets was also photographed.

The coordinates of the targets on both set of images were simultaneously processed through the Bundle Method, keeping as elements of connection the camera calibration parameters. In this way, in a method that could be called of **Measurements of Dynamic Process with Instrumental Calibration**, the coordinates of the moving targets were measured on a three dimensional frame at the same time in which the camera was calibrated.

There is a method named "On Job Calibration" where in an aerial triangulation, additional parameters are introduced to account for camera calibration and other sources of systematic errors in a static measurement process. It is important to point out that here the data for dynamic measurements and those for camera calibration are completely independent in time and space. All the data, however, were simultaneously processed, based on the assumption that the calibration parameters are the same for both set of data.

Calibrate a camera means, in practical terms, to assign numerical values for the principal distance; coordinates of the principal point of photogrammetry; parameters of the radial and decentering distortion curves; as well as the statistics to qualify the obtained results. The calibration of a camera is a guarantee that instrumental systematic errors are eliminated of the measurement process.

The accuracy reached on all the experiments, shows that the developed methodology is adequate to attend the requirements of this kind of essay, e.g. the accurate measure of the targets placed on the sample of wood board submitted to flexion.

Key words: Digital Photogrammetry, Dynamic Photogrammetry, Materials and Deformation, Calibration.

Ficha catalográfica elaborada por Tania de Barros Bággio CRB – 760/PR

Andrade, Regina do Rocio de.

Fotogrametria dinâmica : determinação  
fotogramétrica digital de deformações em elementos  
estruturais da madeira / Regina do Rocio de Andrade. –  
2005.

xiii, 96f. : il., 30cm.

Orientador: Flávio Felipe Kirchner

Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Paraná,  
Setor de Ciências Agrárias.

1. Calibração. 2. Fotogrametria. 3. Materiais  
Deformações. I. Kirchner, Flávio Felipe. II.  
Universidade Federal do Paraná. Setor de Ciências  
Agrárias. III. Título.

CDD – 681.4

CDU – 681.7

## SUMÁRIO

RESUMO.....	xii
ABSTRACT.....	xiii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1. Ensaios para a Determinação de Propriedades Mecânicas de Produtos de Madeira.....	4
2.2. Câmeras Digitais de Pequeno Formato.....	11
2.2.1. Método das Câmeras Convergentes.....	20
2.2.2. “On Job Calibration”.....	21
do dos Alvos Verticais.....	21
3. RECURSOS UTILIZADOS.....	22
3.1. Laboratório de Tecnologia da Madeira.....	22
3.2. Material Fotogramétrico.....	24
3.2.1. Câmera Fotográfica Digital.....	24
3.2.2. Recursos para a Coleta de Foto-Coordenadas.....	26
3.2.3. Recursos para a Calibração de Câmeras e Fototriangulação.....	29
4. METODOLOGIA FOTOGRAMÉTRICA PROPOSTA.....	32
4.1. Consolidação da Metodologia Proposta.....	38
5. MEDIÇÕES E PROCESSAMENTO DE DADOS.....	43
5.1. Medições no Laboratório de Tecnologia da Madeira.....	43
5.2. Medições Fotogramétricas.....	43
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	52
6.1 Relatórios do Laboratório de Tecnologia da Madeira.....	52
6.2. Relatórios da Pesquisa Fotogramétrica.....	55
6.2.1. Calibração do Sistema de Mensuração.....	55

6.2.2. Coordenadas Temporais dos Alvos.....	56
6.2.3. Deslocamentos dos Alvos.....	57
6.2.4. Variação Temporal da Linha Elástica.....	59
6.2.5. Determinação do Módulo de Young.....	62
7. CONCLUSÕES.....	64
7.1 Calibração do Sistema de Mensuração.....	64
7.2. Medições Dinâmicas.....	64
8. CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES.....	67
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	69
ANEXO.....	71



## 1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de materiais com tecnologia de ponta, bem como o conhecimento da resistência, elasticidade e da qualidade desses materiais, tem sido a grande busca da indústria da madeira.

Com o objetivo de desenvolver tecnologia fotogramétrica para a obtenção de dados precisos de fenômenos dinâmicos, foram registrados fotograficamente os ensaios de flexão de peças de compensado de madeira, de modo a obter a deformação temporal em diversos pontos ao longo das mesmas.

Neste trabalho foram realizados experimentos com corpos de prova de madeira, submetidas a flexão, com o objetivo de testar a tecnologia proposta, a de medir as deformações resultantes ao longo da peça, com câmera digital calibrada.

É importante conhecer bem as relações entre as cargas solicitantes e as tensões e deformações produzidas nos materiais utilizados em estruturas para diversas finalidades.

Para uma mesma situação de forças solicitantes, as tensões e as deformações, em geral, são diferentes em cada ponto das peças componentes da estrutura.

A forma da peça é um fator de alteração das tensões e a resposta de cada material às mesmas forças solicitantes é também específica.

As estruturas de madeira são, geralmente, muito resistentes e têm a característica de só romper depois de sofrer grandes deformações.

As características de resistência e elasticidade das peças de madeira são determinadas em laboratório específico. Esses ensaios garantem controle estatístico e a avaliação da qualidade de produtos de madeira, destinados às mais variadas finalidades. Também são de crucial importância no desenvolvimento de tecnologias para produzir artefatos de madeira com as melhores qualidades de resistência e elasticidade. Para tanto, é importante a medição de deformações em diferentes

pontos da superfície dos corpos de prova de madeira submetidos a ensaios de resistência e deformação.

As normas técnicas para construções em madeira estabelecem limites aceitáveis para a resistência e a deformação dos elementos estruturais. A estrutura deve ser projetada e calculada de modo a garantir estabilidade, conforto, segurança, confiabilidade e elegância.

O uso cada vez mais diversificado que se faz da madeira tem exigido avanços muito grandes da tecnologia desse nobre material.

A construção de peças de madeira, com variadas tecnologias, que proporcionam menores deformações com maior resistência já é uma realidade no Brasil e o futuro mostra-se muito promissor em virtude dos estudos que hoje estão sendo conduzidos.

O aumento da disponibilidade de informações sobre os ensaios de laboratório de tecnologia da madeira é de vital importância, seja no controle de qualidade de produtos industrializados, seja no desenvolvimento tecnológico de materiais novos.

A tomada de imagens ao longo do tempo e a posição de alvos que se deslocam em virtude das deformações sofridas pelo corpo de prova, exigem a calibração da câmera. Fazer isto sem perder qualidade com uma só câmera era o desafio.

A aplicação da metodologia proposta e experimentada neste trabalho visa colaborar nessa área como ferramenta que se mostra genérica para a medição de deformações ou de movimentos, ou seja, para uma Fotogrametria Dinâmica.

A sua eficácia foi testada em ensaio de flexão em peças de madeira compostas, quando sujeitas a uma carga concentrada no centro do vão de uma viga simplesmente apoiada.

Um sistema de mensuração para oferecer confiabilidade deve ser calibrado. Assim, a câmera a ser utilizada tem que ter os seus parâmetros bem

conhecidos, a fim de que se possa reproduzir toda a sua geometria com um grau de rigor que seja compatível com o uso que se deseja fazer do instrumento, dentro dos limites geométricos e físicos que caracterizam o equipamento.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 ENSAIOS PARA A DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DE PRODUTOS DE MADEIRA

As propriedades físicas e mecânicas dos materiais têm que ser conhecidas para que possam ser usados de modo adequado. Peças de madeira, por exemplo, podem ser utilizadas de variadas formas e para diversas finalidades em construções ou embalagens.

O avanço tecnológico que tem-se assistido, tem permitido o uso da madeira com grande economia, rapidez , segurança e elegância.

As peças de madeira podem ser maciças ou compostas das mais variadas formas, seja combinando suas fibras em diversas orientações, como nos painéis de compensados ou aglomerados, com mistura ou não de outros materiais visando melhorar as qualidades de resistência e propriedades plásticas e elásticas; seja visando outras propriedades, como resistência a combustão, densidade, impermeabilidade, entre outras.

Quando forças externas atuam num corpo, executam um trabalho de deformação que armazena energia potencial interna ao corpo. Esta energia potencial, ao cessar a ação solicitante, pode recuperar toda a deformação sofrida, ou parte dela, ou ainda não recuperar nada. Daí a noção de elasticidade, que é a propriedade da matéria de armazenar, sob forma de energia potencial interna, o trabalho de deformação provocada pela ação de forças externas e de poder ou não devolver essa energia integralmente ou parcialmente.

Nasce, daí, uma classificação teórica dos materiais (LACERDA,1955):

- a) perfeitamente elásticos, quando toda a energia potencial interna é devolvida anulando a deformação sofrida pela peça;
- b) semi-elásticos, quando parte da energia potencial interna é

transformada em trabalho mecânico, recuperando parte da deformação sofrida pelo material; e

- c) plásticos, quando a energia potencial interna não se transforma em trabalho mecânico e, portanto, o material permanece deformado.

Não existe material perfeitamente elástico. Daí a necessidade de criar um critério para tratar de um material como se fosse perfeitamente elástico.

Para tanto, foi necessário estabelecer o conceito de limite de elasticidade, como sendo a tensão de trabalho elástico a partir da qual o material começa a apresentar resíduos não desprezíveis de deformação. Tal conceito permite enfocar, do ponto de vista prático, os materiais pela classificação segundo suas propriedades elásticas.

Alguns materiais apresentam deformações que variam linearmente com as forças solicitantes quando comprimidos ou tracionados e estes são ditos os que se comportam segundo a Lei de Hooke (LACERDA,1955). Os demais, que não apresentam tal proporcionalidade, são tratados pelas Leis de Bach e Schüle (LACERDA,1955).

A Lei de Hooke, muito simples, diz, conforme LACERDA (1955):

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{\sigma}{E} \quad (2.1)$$

onde,

$\Delta l$  = deformação linear;

$l$  = comprimento original da peça

$\sigma$  = tensão (força por unidade de área numa seção transversal);

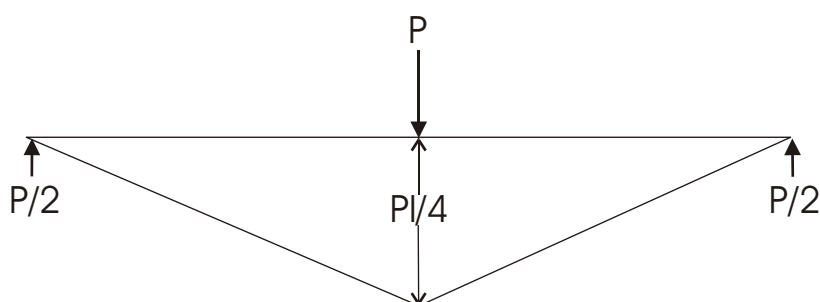
$E$  = coeficiente de elasticidade longitudinal (mesma unidade da tensão), também conhecido como coeficiente ou módulo de Young.

Os esforços a que podemos submeter um sólido elástico são: forças normais (tração ou compressão), esforço cortante, momento fletor e momento

torcedor.

O momento fletor provoca numa seção transversal qualquer da peça ensaiada, uma tensão de compressão na parte superior da seção e de tração na parte inferior. Ao centro da seção, onde não ocorre nem tração nem compressão, temos a linha neutra. O diagrama de distribuição dessas tensões é triangular com os seus máximos nas extremidades, ou seja nas partes mais superior e mais inferior da seção transversal (LACERDA,1955).

FIGURA 1.1 – DIAGRAMA DO MOMENTO FLETOR DE VIGA COM CARGA CENTRAL



O diagrama do momento fletor, conforme figura 1.1, para viga simplesmente apoiada com carga central, no ensaio de laboratório é triangular, com valor máximo na metade do vão e nulo nas extremidades de apoio. No centro do vão livre vale conforme LACERDA (1955):

$$M_{l/2} = \frac{Pl}{4} \quad (2.2)$$

onde:

$M_{l/2}$  = momento fletor no centro do vão livre;

$P$  = carga aplicada no centro do vão livre;

$l$  = comprimento do vão livre.

A sua variação é, portanto, linear e como a seção transversal é constante, as tensões de compressão e tração também variam linearmente, o que faz com que os

esforços correspondentes variem linearmente. Embora cada ponto da peça ensaiada desloque-se para baixo, linearmente segundo o tempo, a velocidade de cada ponto é diferente e o conjunto descreve a deformação da linha elástica, segundo uma parábola do terceiro grau, na qual a flecha máxima ocorre no centro da peça, onde a carga foi aplicada. A equação da linha elástica de uma viga simplesmente apoiada, com carga concentrada aplicada no centro do vão é<sup>1</sup>, conforme LACERDA (1955):

$$Y = -\frac{P}{12EJ}x^3 + \frac{Pl^2}{16EJ}x \quad (2.3)$$

para  $x = l/2$ , temos:

$$Y = \frac{Pl^3}{48EJ} \quad (2.4)$$

Nas equações (2.3) e (2.4):

$Y = f$  = flecha ou ordenada máxima da linha elástica;

$P$  = carga aplicada no centro do vão livre;

$E$  = módulo de Young;

$J$  = momento de inércia da seção transversal da peça ensaiada

$l$  = vão livre.

---

<sup>1</sup>A equação (2.3) é válida para valores de  $x$  iguais ou inferiores ao do ponto de aplicação da carga. Para representar a linha elástica inteira, basta tomar a origem no apoio da esquerda fazendo  $x$  crescer para a direita até o ponto de aplicação da carga e, em seguida, tomar a origem no ponto de apoio da direita e fazer  $x$  variar positivamente para a esquerda até o ponto de aplicação da carga.

Da equação (2.4), resulta:

$$E = \frac{Pl^3}{48YJ} \quad (2.5)$$

$$J = \frac{bh^3}{12} \quad (2.6) \text{ LACERDA (1955)}$$

onde,

J = momento de inércia da seção transversal

b = base da seção transversal

h = altura da seção transversal

Da equação 2.3, resulta:

$$E = \frac{-4Px^3 + 3Pl^2x}{48JY} \quad (2.7),$$

onde a origem é no ponto de apoio da esquerda.

Essas expressões podem ser escritas em função de diferença de força e diferença de deformação correspondentes, como especificam as normas brasileiras (ABNT). Ver exemplos de aplicação das fórmulas 2.5, 2.6 e 2.7 no capítulo 6, item 6.2.5.

Os ensaios em laboratórios de tecnologia da madeira podem submeter corpos de prova a qualquer esforço solicitante. Esses ensaios são de altíssima importância para qualquer país, pois permitem, de um lado, um eficaz controle de qualidade e, ao mesmo tempo, o desenvolvimento de novas teorias voltadas para o uso mais adequado da madeira. O tratamento estatístico dado aos ensaios mais elaborados, representa confiabilidade baseada em princípios modernos; pode fazer variar as condições de testes na busca do aprendizado experimental e constitui a ferramenta fundamental para o desenvolvimento de materiais compostos, apropriados para as mais variadas aplicações.



O Laboratório de Tecnologia da Madeira do Curso de Engenharia Florestal da Universidade Federal do Paraná reúne as condições para continuar a evoluir rapidamente, em virtude dos inúmeros trabalhos de alta tecnologia que executa, atendendo um setor industrial com alta demanda de novos materiais a partir da madeira.

A norma brasileira para a determinação da Resistência à Flexão Estática de Compensados é a NBR<sup>2</sup> 9533/1986 que tem como objetivo a determinação do módulo de elasticidade e resistência máxima à flexão estática de compensado. Para tanto, indica outros fatores que devem ser observados para a realização do ensaio, tais como determinação de teor de umidade, massa específica, procedimentos de amostragem e condicionamento de corpos de prova. A norma descreve o instrumental, as dimensões dos corpos de prova e a execução do ensaio. As seguintes fórmulas são recomendadas pela ABNT:

$$V = \frac{kL^2}{6e} \quad (2.8)$$

onde:

V = velocidade de carregamento em mm/s;

k = 0,00005 = taxa de deformação da fibra;

L = distância entre apoios (vão) em mm;

e = espessura do corpo de prova em mm.

O módulo de elasticidade de cada corpo de prova, é representado conforme ABNT é determinado através da seguinte expressão:

---

<sup>2</sup> As normas brasileiras podem ser encontradas na ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas).

$$E_b = \frac{L^3(F_2 - F_1)}{4le^3(S_2 - S_1)} \quad (2.9)$$

onde:

$E_b$  = módulo de elasticidade em N/mm<sup>2</sup>;

$L$  = distância entre os pontos de apoio (vão) em mm;

$l$  = largura do corpo de prova, em mm;

$e$  = espessura do corpo de prova, em mm;

$F_2 - F_1$  = incremento de carga no trecho reto da curva carga-deformação, em newtons, com precisão de 1%;

$S_2 - S_1$  = incremento de deflexão no ponto central do vão, correspondente ao incremento da carga, com precisão de 0,01mm.

A tensão de ruptura, para cada corpo de prova, deve ser calculada com a seguinte expressão:

$$T_r = \frac{3F_{\max}L}{2le^2} \quad (2.10)$$

onde:

$T_r$  = tensão máxima de ruptura à flexão estática em N/mm<sup>2</sup>;

$F_{\max}$  = carga de ruptura em N;

$L, l, e$  = como definidos para a (2.9).

O relatório deve conter:

- a) – Tipo do compensado, segundo a NBR 9490;
- b) – Identificação do corpo de prova;
- c) – Data do ensaio;
- d) – Teor de umidade do corpo de prova na ocasião do ensaio, segundo a NBR 9484;

- e) – Massa específica aparente do corpo de prova segundo a NBR 9485;
- f) Resultados obtidos
- g) Referência à norma utilizada.

## 2.2 CÂMERAS DIGITAIS DE PEQUENO FORMATO

As câmeras de pequeno formato em geral têm a capacidade de focalizar objetos situados a qualquer distância, tendo, por isso, a sua distância principal variável segundo a conhecida equação:

$$\frac{1}{p'} = \frac{1}{f} - \frac{1}{p} \quad (2.11)$$

onde,

$p'$  = distância principal ( distância do centro de perspectiva ao plano focal )

$f$  = distância focal Gaussiana

$p$  = distância entre o objeto e o centro de perspectiva

Nas câmeras aerofotogramétricas, em virtude de  $p$  ser muito grande, resulta  $p' = f$ . Mais precisamente, crescendo  $p$  na (2.11)  $p'$  tende para  $f$ . Nas câmeras de pequeno formato, a distância principal  $p'$  varia com a focalização da imagem.

Algumas câmeras de pequeno formato permitem zoom, o que significa uma variação ainda maior da distância principal. Tais variações são necessárias para colocar em foco as imagens de objetos que se desejam fotografar e, ao mesmo tempo, no caso do zoom, ajustar a escala da imagem para adequar aos fins

desejados. Contudo, estas facilidades acarretam alterações das propriedades geométricas das câmeras. Quando o objeto está suficientemente distante da objetiva para que a distância focal coincida com a distância principal, basta ter a câmera calibrada para o infinito. Nos demais casos, a câmera deverá estar calibrada para as condições de uso.

Conforme BROWN (1971) qualquer movimento que se faça na objetiva, alterará as distorções. A distorção descentrada, por não ser simétrica, não mantém o seu gráfico paralelo quando a focalização é alterada.

Em filmes, o elemento pictórico é o grão de brometo de prata espalhado na emulsão. O tamanho médio dos grãos de brometo de prata determina a granulação e, assim, a rapidez do filme. Os filmes de granulação mais fina são mais próprios para aplicações técnicas, enquanto os de granulação maior são mais adequados para imagens artísticas.

Nas câmeras digitais, no lugar do filme temos um CCD, sigla em língua inglesa de “Charge Coupled Device” (instrumento que cria pares de carga) – a uma carga de fótons o instrumento faz corresponder uma carga elétrica (WEHRLI, 2001).

As técnicas desenvolvidas na década de 1970 para o processamento digital de imagens geradas em satélites artificiais continuaram sendo aperfeiçoadas (BÄHR, 1991) e, com os enormes avanços dos computadores em termos de capacidade de memória e velocidade viabilizou-se totalmente o uso de imagens digitais.

Na tecnologia digital, o elemento pictórico é uniforme e ganhou o nome de **pixel**, que, da língua inglesa foi formada das primeiras sílabas das palavras “**p**icture **e**lement” (elemento pictórico) (ANDRADE, 1998 e 2003). É o CCD que produz o pixel.

O CCD é um sensor de imagens que converte fótons (luz) em elétrons (eletricidade). Quando fótons atingem um sensor de imagem, um elétron é liberado e o sensor adiciona esta carga elétrica à carga que já havia coletado, num processo

de integração. Quanto mais intensa (brilhante) for a fonte de luz, mais fótons atingirão o sensor para integrar e menos tempo é exigido para coletar uma dada quantidade de carga.

O modo como os elementos fotossensíveis, formadores dos pixels, que compõem um sensor de imagem CCD coletam cargas, tem sido freqüentemente comparado com vasos ou poços sendo preenchidos por pingos de água. Dessa analogia vem o termo “full-well capacity”, significando o máximo de carga (número de elétrons) que um elemento pode segurar sem espirrar carga no elemento adjacente.

A tecnologia de transferir cargas elétricas coletadas em cada pixel é feita de modo serial para uma leitora amplificadora. A carga elétrica gerada no local do pixel (“coupled”) é transferida pixel por pixel, um a cada tempo, em uma seqüência pré definida que não pode ser interrompida. Quando a carga do pixel é transferida para a leitora amplificadora ela é destruída no elemento sensor. A quantidade de carga transferida e amplificada é proporcional à quantidade de fótons que gerou a carga elétrica e, portanto, proporcional à intensidade (brilho) de luz que gerou a carga (pixel). Veja (WEHRLI, 2001).

Entre outras, duas propriedades de um CCD ganham importância prontamente quando o interesse está focado para precisão: **resolução geométrica** e **resolução radiométrica**.

**Resolução Geométrica** significa o tamanho do pixel, e, no uso diário, tem sido expresso de diversas formas, como **µm** (micrômetro), **dpi** (“dots per inch”- pontos por polegada), **ppi** (“points per inch”) quando na imagem; quando no terreno, levam em conta a escala da imagem, em **m** (metros), por exemplo. Nem sempre a resolução geométrica é igual segundo as linhas e colunas de um arquivo de pixels, chamado de **bitmap** (ANDRADE, 1998 e 2003).

**Resolução Radiométrica** diz em quantos tons está dividida uma cor. Por exemplo, quantos tons de cinza colocamos entre o branco puro e o preto puro.

Os computadores pessoais trabalham com bytes de 8 bits ou múltiplos deste valor. Com 8 bits é possível representar, em linguagem binária  $2^8$  sinais distintos, ou seja, 256 números de uma seqüência, por exemplo, digamos de 0 a 255. Associando 0 ao preto e 255 ao branco, qualquer número intermediário representará um tom cinza particular. Cada bit dobra a capacidade representativa, ou seja, 9 bits permitiria representar  $2 \times 256 = 512$  números (ANDRADE,1998 e 2003).

Assim, aumentando o número de bits poderemos representar mais tons entre o preto e o branco, ou seja, teremos uma discriminação maior dos tons. Há sensores de 10 e de 12 bits. Com 10 bits podemos representar 1024 tons e com 12 bits, 4096. O que se pode ganhar com um sensor de 12 bits, por exemplo, é eliminar os tons mais claros e mais escuros inexistentes ou em pouquíssima quantidade na imagem, examinando o seu histograma. O histograma mostra a freqüência de faixas de tons. Um tratamento desse tipo, antes de converter a imagem para 8 bits que os computadores usam, resulta em uma imagem de melhor qualidade radiométrica. A transferência de 12 bits, por exemplo, para 8 bits consiste num mapeamento de uma representação na outra, que permite distribuir (mapear) os tons existentes na imagem de 4096 valores 12 bits para os 256 valores de 8 bits (ANDRADE,1998 e 2003).

A representação de cores, no sistema RGB (sigla inglesa de “Red, Green e Blue” – vermelho, verde e azul) é feita nos computadores pessoais com 24 bits normalmente – 8 bits para cada cor fundamental.

**Compressão de Imagem** (WEHRLI,2001) é outra característica criada com o advento das imagens digitais. As imagens de alta resolução geométricas exigem grande quantidade de memória para serem armazenadas. Nasceu daí o desejo de comprimir os arquivos de imagens (bitmaps), sem perda de informações. Há casos em que alguma perda de informações pode ser aceitável, digamos, quando o olho humano não percebe nenhuma diferença entre a imagem original e a imagem

comprimida e descomprimida para visualização. Na área técnica é desejável não perder nada de informação, principalmente a que diz respeito a geometria.

Os arquivos de imagens (bitmaps) são montados segundo formatações diferentes. Eles possuem um cabeçalho no qual os parâmetros do arquivo, tais como dimensões e outros são definidos. Os formatos mais usados são TIFF, BMP, JPEG, GIF.

Existem formatos particulares, como é o caso do arquivo “raw” da Nikon, denominado NEF, sigla para **Nikon Electronic Format**. O formato NEF tem a propriedade de, sem perder informações, armazenar uma imagem, que no formato TIFF gastaria 14MB de memória, em algo um pouco superior a 7MB (MANUAL NIKON).

O formato JPEG pode reduzir o arquivo em 4, 8 e 16 vezes na câmera utilizada nesta pesquisa (MANUAL NIKON).

Da mesma maneira como o formato particular NEF pode reduzir em quase 2 vezes o tamanho de um arquivo. Existem outros formatos que permitem a compressão de imagem sem perda, como exemplo o IZW, que pode fazer pequenas compressões e muito lentamente (WEHRLI,2001).

Uma nova técnica de compressão é a denominada wavelet compression. O formato JPEG 2000 usa esta técnica e, assim, também o MrSID que é a abreviatura de Multi-resolution Seamless Image Database (WEHRLI,2001).

A troca do filme pelo CCD nas câmeras de pequeno formato acrescentou capacidades extraordinárias, muitas das quais descritas a seguir:

- 1) Enorme capacidade de armazenamento de imagem – enquanto num filme cabem 36 imagens analógicas nas câmeras de 35 mm, um cartão de memória “flash”, também conhecido como “Digital Film Card” tem capacidade de até 1GB nestes dias e é muito fácil de ser trocado na câmera quando necessário.

- 2) Visualização imediata da imagem tomada.
- 3) Registro de todos os parâmetros de uma imagem, tais como distância focal utilizada, abertura do diafragma, tempo de exposição, método de focalização, método de determinação da luminosidade, dia, mês, ano, hora, minuto e segundo da exposição.
- 4) Referencial materializado pelo próprio CCD, como um “reseau” de resolução igual ao do CCD (ANDRADE, 2001).
- 5) Visualização em tela de cristal líquido da imagem do objeto a ser registrada (MANUAL NIKON).
- 6) Recursos de “zoom” e de macro “close-up”, o que amplifica enormemente o campo de aplicação da fotogrametria com câmeras de pequeno formato (MANUAL NIKON).
- 7) Possibilidade de escolha da resolução da imagem (MANUAL NIKON).
- 8) Possibilidade de escolha de alta resolução em imagem em formato “raw”, transformável em formato “tiff”, gastando a metade da memória e sem perda de qualidade geométrica e radiométrica (MANUAL NIKON).
- 9) Possibilidade de processamento em computador. As imagens digitais podem ser tratadas com qualquer algoritmo já conhecido ou que venha a ser desenvolvido, ganhando, assim, um potencial de uso e de aplicações antes inexistente.
- 10) A economia trazida por imagens digitais é muito maior do que foi inicialmente imaginado, em virtude do desenvolvimento de meios de armazenar e ler



rapidamente enormes quantidade de dados.

A calibração das câmeras é sempre um requisito imprescindível para garantir um sistema de mensuração de elevada confiabilidade. Existem alguns métodos muito importantes aplicáveis à calibração de câmeras de pequeno formato e particularmente para câmeras digitais de pequeno formato.

Em trabalho publicado em 1857 citado por ANDRADE (1998 e 2003), Ludwig von Seidel descreveu os cinco tipos básicos de aberração em lentes e espelhos, aplicáveis a sistemas que trabalhem com luz monocromática. Esses defeitos ficaram conhecidos como “As Cinco Aberrações de Seidel”. Tais aberrações são:

**Aberração Esférica:** quando raios de luz cruzam o eixo óptico de uma lente se encontram do outro lado, em diferentes posições do eixo óptico pelo fato de que os raios de luz atravessam a lente em diferentes distâncias do seu centro e as lentes têm o formato esférico, ao invés daquele que deveria ter para evitar esse problema.

**Coma:** raios de luz que se cruzam fora do eixo óptico, ao atravessá-la não se encontram no mesmo ponto, mas em pontos que se afastam ou se aproximam da lente ao mesmo tempo que se afastam ou se aproximam do eixo óptico, desenhando uma cauda.

**Astigmatismo:** quando a lente não é totalmente simétrica em relação ao seu eixo óptico, então os diferentes perfis diferem, fazendo com que pontos situados numa grade de linhas horizontais e verticais, por exemplo, tenham essas linhas focalizadas em planos diferentes.

**Curvatura de Campo:** quando os pontos de um objeto plano são focalizados em uma superfície curva.

**Distorção:** mesmo quando as aberrações prévias são corrigidas, os pontos são focalizados à distâncias erradas em relação ao eixo óptico. Esta é a chamada

“Quinta Aberração de Seidel”. A distorção ocorre em virtude da superfície da lente ao invés de ser um parabolóide de revolução, é aproximada por uma superfície esférica.

Foi o professor A. E. CONRADY (1919) quem, intuitivamente, desenvolveu o modelo matemático da distorção. Hoje, prefere-se chamar essa aberração de distorção radial simétrica para diferenciar da distorção descentrada (que possui duas componentes denominadas de distorção radial assimétrica e distorção tangencial). Veja detalhes das distorções radial simétrica e da descentrada em ANDRADE (1998 e 2003). A distorção radial simétrica está representada na equação 2.12.

$$\delta r = K_1 * r^3 + K_2 * r^5 + K_3 * r^7 + \dots \quad (2.12)$$

onde:

$\delta r$  = distorção radial simétrica

$K_i$  = coeficientes do polinômio

$r$  = distância do ponto principal de fotogrametria.

Os modelos matemáticos para representar a distorção descentrada foram desenvolvidos ao longo e cerca de meio século, tendo início com o trabalho de CONRADY (1919), depois por BROWN (1965 e 1966). A forma final do modelo matemático para a distorção descentrada é dada pela 2.13.

$$\begin{cases} \delta x = [P_1(r^2 + 2x^2) + 2P_2xy] \\ \delta y = [2P_1xy + P_2(r^2 + 2y^2)] \end{cases} \quad (2.13)$$

onde:

$\delta x$  = componente x da distorção descentrada;

$\delta y$  = componente y da distorção descentrada;

$P_i$  = coeficientes;

$r$  = distância do ponto principal de fotogrametria;

$x$  = coordenada x no sistema fotogramétrico;

$y$  = coordenada y no sistema fotogramétrico.

Os grandes avanços em calibração de campo de câmeras foram fruto dos

trabalhos de DUANNE BROWN (1964 e 1969), de MERCHANT (1968 e 1971). EISENHART (1963) estabeleceu princípios estatísticos para a avaliação da precisão e exatidão da calibração de instrumentos.

As câmeras digitais apresentam muitas características que facilitam sobremaneira o seu uso como instrumento métrico. Além disso, apresentam uma quantidade enorme de recursos técnicos, incluindo a sua total adequação para o processamento de seus dados em computador.

As câmeras de pequeno formato permitem a focalização da imagem e muitas possuem zoom. Como geralmente as câmeras são calibradas para distâncias grandes do objeto fotografado (focalização para o infinito, como nas câmeras aerofotogramétricas), quando a sua aplicação é para objetos próximos, tal calibração é totalmente inadequada. Um dos caminhos para resolver tal problema seria o de modelar as variações dos parâmetros de calibração com as variações de focalização. Outro, aquele pelo qual se optou, seria o de criar uma metodologia de fácil execução, mas que garantisse maior segurança em termos de eliminação dos erros sistemáticos superiores ao ruído das leituras de coordenadas fotogramétricas – um pixel, no caso, cerca de 3,4  $\mu\text{m}$ . Essa metodologia proposta será explicada no capítulo quatro – Metodologia Fotogramétrica Proposta.

Nos itens 2.2.1, 2.2.2 e 2.2.3 são feitas algumas considerações fundamentais sobre as características dos métodos de calibração de câmeras mais adequados para as câmeras digitais de pequeno formato.

### 2.2.1 Método das Câmeras Convergentes

O Método das Câmeras Convergentes foi desenvolvido por BROWN (1969). É um método muito adequado para calibrar câmeras de pequeno formato destinadas à Fotogrametria à Curta Distância.

Consiste em tomar fotos convergentes que geram uma geometria muito forte, capaz de quebrar todas as correlações entre os parâmetros de calibração e os de orientação externa da câmera em fotos tomadas com eixos não convergentes.

O método funciona muito bem com a tomada de quatro fotos, uma perpendicular aos alvos, outra girada em torno do eixo  $z$  em  $90^0$  e outras duas convergentes. O giro em torno de eixo  $Z$  quebra as correlações entre as distorções radial simétrica e a descentrada. Veja essas correlações em MERCHANT (1968, 1971 e 1979).

Não é necessário, para este método de calibração, conhecer as coordenadas dos alvos fotografados com rigor. Basta materializar o referencial, o que pode ser feito fixando uma das posições da câmera e a sua atitude e a distância entre duas posições de centros de perspectiva, ou a medição de uma distância entre dois alvos quaisquer. Esse método é o mais robusto de todos, no sentido que os resultados são muito precisos em virtude de sua forte geometria.

ANDRADE (2001) utilizou esse método para a calibração de uma câmera de pequeno formato digital, tomando fotos da parede do prédio menor do Bloco 6 do Centro Politécnico, na UFPR, onde alvos para tal fim estão pintados. Nesse trabalho o referencial de foto foi tomado como sendo o mesmo do “bitmap” criado para arquivar as imagens, fazendo uma translação da origem para o canto inferior esquerdo do “bitmap” e aplicando uma reflexão ao eixo  $y$ , a fim de ter um referencial dextrogiro como exige o programa GeoBundle®, cedido pela Empresa Geokosmos Geodésia e Consultoria Ltda., para processar as fototriangulações. Na dissertação de mestrado, do Curso de Engenharia Florestal, ANDRADE (2001), assim como

nesta tese, as coordenadas fotogramétricas foram medidas com o pixel como unidade linear.

### 2.2.2 “On Job Calibration”

“On Job Calibration” (KENEFICK et al, 1972) não é, rigorosamente, um método de calibração. Trata-se de um procedimento adequado para absorver as incertezas de uma calibração realizada “a priori”. Este procedimento permite que os parâmetros de calibração sofram variações segundo as suas estatísticas num processo de fototriangulação, ou seja, a eles são aplicados pesos baseados nas suas variâncias. Desta forma, obtém-se uma propagação de variância mais adequada e que mostra estatísticas mais significativas. Não obstante, este procedimento é conhecido como sendo um método de calibração. É intensamente utilizado em Aerofotogrametria, pois permite a obtenção de resultados mais precisos nas aerotriangulações pelo fato de não propagar os erros da calibração sobre os demais parâmetros.

### 2.2.3 Método dos Alvos Verticais

Este método utiliza alvos colocados segundo fios de prumo. Veja MERCHANT (1973). Com isso, é possível aplicar injunções de alinhamento segundo a vertical dos alvos e também de suas imagens, o que dá uma força geométrica muito alta ao método. Trata-se de uma metodologia muito engenhosa e por isso foi cogitada.

### 3. RECURSOS UTILIZADOS

Este trabalho teve os dados obtidos no Laboratório de Tecnologia da Madeira do Curso de Engenharia Florestal, da Universidade Federal do Paraná, tendo como objetivo desenvolver metodologia fotogramétrica para a determinação das deformações em diversas posições de corpos de prova de madeira submetidos a ensaios de flexão.

Ao desenvolver das pesquisas, alterações e aperfeiçoamentos importantes foram feitos aos projetos iniciais, resultando daí uma metodologia robusta para resolver problemas dinâmicos com fotogrametria. Desta forma, a câmera digital, equipamentos de laboratório de ensaios de corpos de prova e programas de computador, foram utilizados na construção de uma sistemática eficiente para a obtenção de dados precisos de um processo dinâmico.

A descrição dos recursos utilizados seguem neste capítulo.

#### 3.1. Laboratório de Tecnologia da Madeira

O Laboratório de Tecnologia da Madeira do Centro de Ciências Florestais e da Madeira da UFPR apresenta instalações modernas, com local coberto, adequado para o armazenamento de material a ser testado.

A sala de ensaios de resistência e deformação de corpos de prova é hermética e com controle rigoroso de umidade e temperatura. O acesso de pessoas é controlado a fim de garantir a manutenção dos parâmetros ambientais do laboratório.

O equipamento - Máquina EMIC DI.10000MF (Figura 3.1) - possui diversos acessórios que o capacitam para a execução de variados tipos de ensaios, como flexão e tração, sempre atendendo normas específicas e é ligado, por meio de

sensores, a um microcomputador que recolhe os dados e os processam fornecendo relatórios que incluem gráficos de três tipos: tempo versus deformação; tempo versus força solicitante; e deformação versus esforço solicitante.

A configuração utilizada foi a que apresenta uma peça com dois apoios simples, onde se posiciona o corpo de prova que se move verticalmente, para cima a uma velocidade escolhida, neste caso, 14mm/min. No centro do vão está uma peça de madeira dura que, ao ser tocada pelo corpo de prova, transmite uma força vertical. Tal força é medida com um sensor, cujos dados são transferidos ao micro computador. Ao longo de um ensaio acontecem duas situações: a peça sofre deformação e comprime o sensor de força. A deformação da peça é medida no centro do vão livre. Consiste na determinação da distância entre a base que se move para cima elevando os apoios e o centro da peça que é mantida em posição fixa.

FIGURA 3.1 – MÁQUINA EMIC DI.10000MF



FONTE: O AUTOR (2005)

Os corpos de prova, retirados de painéis compensado de madeira tropical (amescla) e preparados segundo as normas EN310, tem as seguintes dimensões:

- Comprimento total: 410 mm
- Largura: 75 mm
- Espessura: 18 mm
- O vão livre é de 360 mm

### 3.2. Material Fotogramétrico

#### 3.2.1. Câmera Fotográfica Digital

Este trabalho foi realizado com uma câmera digital da marca NIKON, modelo Coolpix5700 (Figura 3.2), com tripé e as seguintes especificações:

**CCD** de 5,24 milhões de pixels

Imagens com 2560 x 1920 pixels

Tamanho do CCD: 8,8 x 6,6 mm

1 pixel = 3,4375 micrômetros

**Lentes** 8x Zoom Kikor

Distância Focal  $F = 8,9 - 71,2$  mm

F stop:  $f/2,8 - f/4,2$

Construção – Quatorze elementos em dez grupos

**Zoom Digital** – 4x

**Focalização**

Intervalo de Focalização:

50 cm -  $\infty$  automático ou;

3 cm -  $\infty$  em macro e focalização manual

(medidas a partir da superfície da objetiva)

**Mídia** Cartões CompactFlash (512 MB, 1 GB)



**Formatos de Arquivos**

Comprimidos: JPEG:

FINE: 1:4

NORMAL: 1:8

BASIC: 1:16

Não Comprimidos:

NEF (raw Nikon Electronic Format)

HI (TIFF)

**Exposição**

Mensuração:

256-segment matrix

Spot

Center-weighted

AF spot

**Obturador**

Velocidade 5 min – 1/4000

**Abertura**

Diafragma de 7 lâminas

Intervalos de 1/3EV

**Sensitividade**

Iso EQUIVALENTE 100, 200, 400, 800 ou Auto

**Self-timer**

Três ou dez segundos de duração

**Built-in Speedlight**

Equipado com pop-up automático

Sincronizado

**Interface**

USB

**Saída de Vídeo**

NTSC e PAL

**I/O Terminais**

DC input

Audio/video (a/V) output

Data output (USB)

**Fonte de Energia**

Six-volt rechargeable Nikon EN-EL1 e outros

**Software**

Nikon View 5

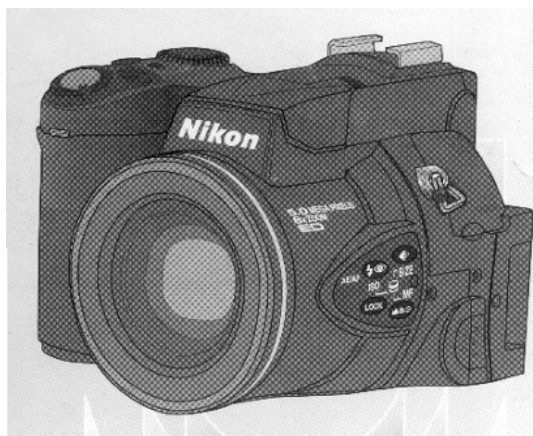
### **Relógio Interno**

Digital. Registra, para cada imagem, ano, mês, dia, hora, minuto e segundo.

### **Registros**

Além da data e hora, no arquivo de cada foto são registrados todos os parâmetros fotogramétricos da tomada da foto, tais como abertura do diafragma, tempo de exposição, etc.

FIGURA 3.2 – CÂMERA DIGITAL NIKON COOLPIX5700



FONTE: (MANUAL DA CÂMERA DIGITAL NIKON COOLPIX5700)

### **3.2.2. Recursos para a Coleta de Foto-coordenadas**

A coleta de foto-coordenadas foi realizada com o software da Geokosmos, denominado ReadDigiCoord®, especial para câmeras fotogramétricas digitais de pequeno formato, desenvolvido para atender a demanda dos trabalhos desta tese.

Ao abrir o programa visualizamos duas janelas: a menor, situada à direita superior da tela, mostra a imagem inteira. A maior, situada à esquerda, mostra a imagem ampliada, centrada no ponto escolhido com o “mouse” na imagem da janela menor. A imagem será mostrada na mesma resolução da tela, mas há a possibilidade de ampliar ou reduzir.

O programa cria arquivos de coordenadas de foto no formato do programa GeoBundle®, também da Geokosmos, que processa fototriangulações. Os arquivos são organizados segundo faixas ou blocos de imagens ou imagens únicas que se

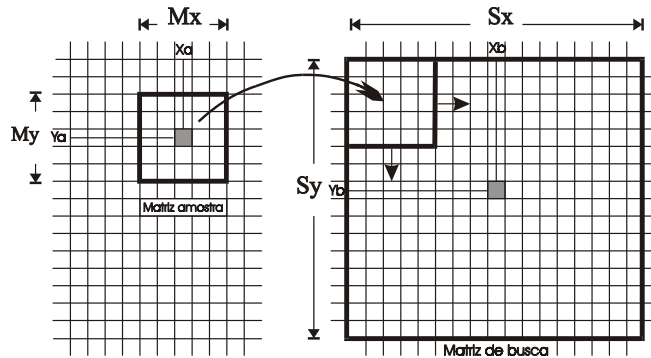
deseje fototriangular.

A leitura das coordenadas ainda é manual, embora a Geokosmos já tenha desenvolvido um programa denominado ReadPix<sup>®</sup> para ler, automaticamente, coordenadas de marcas fiduciais em imagens aéreas digitalizadas em “scanners” . Utilizando as mesmas rotinas e fazendo amostras dos alvos é possível localizá-los, por correlação estatística de imagens.

O operador aperta na tecla “action” e depois na tecla “add one point” e escolhe se deseja que o programa aumente o nome do ponto com o nome da imagem ou não. Dá um nome ao ponto escolhido e aperta o botão esquerdo do mouse. Na tela embaixo diz a operação que está sendo feita (measuring point XXX, por exemplo). Aparecem também as coordenadas em pixel, num sistema dextrógiro que nada mais é do que o sistema original de coordenadas de pixel com a origem transladada para o canto inferior esquerdo da imagem e refletido o eixo **y** , ou seja, o eixo de contagem das linhas. Agora, o operador posiciona, com o mouse, o escantilhão de pontaria, centrando-o no ponto desejado e aperta o botão esquerdo do mouse para registrar (armazenar) o nome do ponto e as suas coordenadas no referencial descrito, em unidades de pixel.

O programa “ReadDigiCoord<sup>®</sup>” permite a repetição de leituras dos mesmos pontos. Não extrai média, apenas registra o que é lido, tenha ou não o mesmo nome. Esse programa, em breve, fará a leitura automática de alvos pré-sinalizados, bem como nomeará automaticamente os pontos lidos. Uma função de eficácia comprovada para detectar a imagem de um alvo é o coeficiente de correlação, ver Figura 3.3, dado pela expressão estatística 3.1 (Veja ANDRADE, 1998 e 2003):

FIGURA 3.3 – PROCURA DE PONTOS HOMÓLOGOS



FONTE: (ANDRADE, 1998)

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n x_i \right) \left( \sum_{i=1}^n y_i \right)}{\sqrt{\left( \sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \right) \left( \sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n y_i \right)^2 \right)}} \quad (3.1)$$

onde:

$r$  = valor da correlação

$x_i$  = valor da cor (tom) do “pixel”  $i$  na matriz de amostra;

$y_i$  = valor da cor (tom) do “pixel”  $i$  na matriz de busca;

$n$  = número de “pixels” na matriz de amostra.

O campo de existência de  $r$  é:  $\{-1 \leq r \leq 1\}$

$r = -1$  significa correlação total e negativa entre as variáveis  $x$  e  $y$ , ou seja, quando uma cresce a outra decresce. Há uma relação de dependência total entre elas;

$r = 0$  diz não haver relação de dependência nas variações de  $x$  e  $y$ .

$r = 1$  mostra haver correlação total e positiva entre as variáveis  $x$  e  $y$ . Assim, quando uma cresce, a outra também cresce. Há uma relação de dependência total entre elas.

$r$  entre 0 e 1 significa haver correlação positiva entre as variáveis  $x$  e  $y$ , sendo que o valor de  $r$  mede o grau de dependência (1 significa dependência total)

*r* entre 0 e  $-1$  mostra haver dependência negativa e o valor de *r* é a medida do grau de dependência.

É extremamente importante ressaltar que a correlação estatística não implica, necessariamente, em dependência geométrica ou física, mas havendo dependência geométrica e física, necessariamente haverá correlação estatística entre as duas entidades cujos valores variam.

Para encontrar o ponto P', homólogo de P da imagem A na imagem B é necessário ter uma matriz de busca em B que contenha P'. Faz-se, então, o cálculo de *r* com a matriz de amostra, retirada de A, onde P é representado pelo pixel de cada uma das matrizes candidatas em B. Matriz candidata é toda a sub-matriz em B com as mesmas dimensões da matriz de amostra. O resultado de *r* mais próximo de 1 corresponde ao ponto que apresenta maior probabilidade de ser P' – o homólogo de P. Veja ANDRADE (1998 e 2003).

Outra ferramenta para identificar pontos pré-sinalizados, estudada em WANDRESEN (2004) é a integração entre redes neurais e correlação.

### 3.2.3. Recursos para Calibração de Câmeras e Fototriangulação

A calibração da câmera e a fototriangulação foram processadas com o programa GeoBundle®, que ajusta, por mínimos quadrados, grandes blocos de fotografias aéreas, fotos terrestres, fotogrametria de curta distância, imagens de raios X, microfotografias, com o método conhecido por "Bundle Method". Esse programa utiliza algoritmos especiais para a redução das equações normais. Trabalha com particionamento recursivo das equações normais, podendo acrescentar, nas referidas equações, injunções a todos os parâmetros de uma fototriangulação, tais como coordenadas dos centros de perspectiva, ângulos de Euler, pontos do espaço objeto e outras especiais como de latitude, de longitude, de

altitude geométrica e de distância.

Em MUELLER et al (1973), estão desenvolvidos algoritmos para aplicar injunções de posição absoluta, de posição relativa, de direção e injunções internas (inner constraints). No exemplo a seguir está a aplicação de uma injunção de distância entre dois pontos.

O modelo matemático para a injunção de distância é:

$$D = \left[ (X_i - X_j)^2 + (Y_i - Y_j)^2 + (Z_i - Z_j)^2 \right]^{1/2} \quad (3.2)$$

O erro de fechamento:

$$\varepsilon = r_{ij} - \left[ (X_i^0 - X_j^0)^2 + (Y_i^0 - Y_j^0)^2 + (Z_i^0 - Z_j^0)^2 \right]^{1/2} \quad (3.3)$$

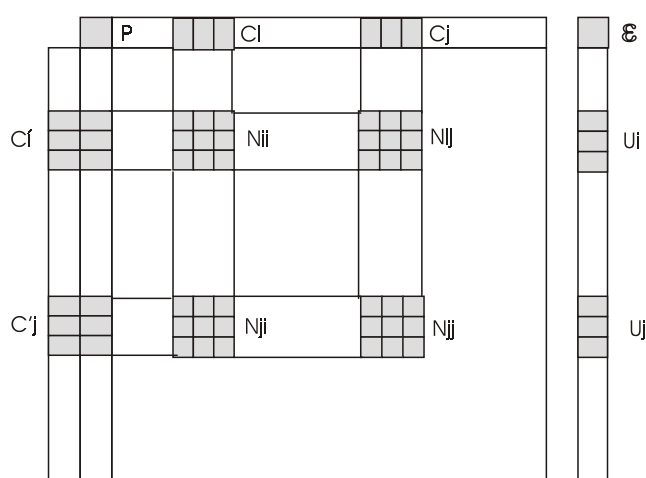
E a matriz de injunção C, tem os seus elementos não nulos calculados por:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial D}{\partial X_i} = \frac{X_i^0 - X_j^0}{D^0} \\ \frac{\partial D}{\partial Y_i} = \frac{Y_i^0 - Y_j^0}{D^0} \\ \frac{\partial D}{\partial Z_i} = \frac{Z_i^0 - Z_j^0}{D^0} \\ \frac{\partial D}{\partial X_j} = -\frac{\partial D}{\partial X_i} \\ \frac{\partial D}{\partial Y_j} = -\frac{\partial D}{\partial Y_i} \\ \frac{\partial D}{\partial Z_j} = -\frac{\partial D}{\partial Z_i} \end{array} \right. \quad (3.4)$$

A Figura 3.4 mostra o esquema da aplicação de injunção, de acordo com MUELLER, KUMAR e SOLER (1973). O quadrado, representa a matriz N, ainda sem injunção. Em sua parte superior está representada a matriz C da injunção de

distância, mostrando as posições das coordenadas dos pontos  $i$  e  $j$ , onde o valor das derivadas parciais do modelo de distância em relação a essas coordenadas não é nulo. Na vertical, aparece a transposta de  $C$  e seu produto pelo peso atribuído à distância. Sobre a matriz  $N$  aparecem as sub-matrizes  $3 \times 3$  onde se somam os produtos de  $C^T P C$ . Ao lado direito, o vetor  $U$  e os locais onde se somam  $C^T P \varepsilon$ .

FIGURA 3.4 – ESQUEMA DE APLICAÇÃO DA INJUNÇÃO DE DISTÂNCIA



FONTE: (MULLER, KUMAR e SOLER, 1973)

O GeoBundle<sup>®</sup> pode também processar blocos fotografados com câmeras ou sensores distintos, desde que os seus parâmetros de orientação interna sejam conhecidos e em qualquer configuração de tomada das fotos, desde que haja superposição de imagens.

#### 4. METODOLOGIA FOTOGRAMÉTRICA PROPOSTA

Entre os ensaios que podem ser realizados no Laboratório de Tecnologia da Madeira está o de flexão que é de interesse desta pesquisa.

O equipamento programado para as experiências de flexão foi o **EMIC DI.10000MF**, dotado de acessórios para realizar variados tipos de ensaios. Está localizado em sala hermética com controle de temperatura e umidade. Possui sensores que medem a força aplicada, a deformação no ponto onde a força é aplicada e o tempo é medido pelo operador, manualmente, com um cronômetro.

Tais dados alimentam um computador pessoal com programa denominado **Tesc versão 1.08** que processa os dados, prepara relatórios e gráficos. O método de ensaio de flexão utilizado foi o adotado pela **ABIMCI – Flexão Não Estrutural CEN – 310**.

Os equipamentos para ensaios de resistência e deformação geralmente têm as mensurações associadas a pontos específicos da peça, e, no caso mais geral no ponto onde a força solicitante é aplicada – neste caso, no centro da peça ensaiada. A norma brasileira que trata da determinação da resistência à flexão estática de compensado é a NBR 9533 de 1986.

O Laboratório de Tecnologia da Madeira da UFPR está capacitado a realizar ensaios segundo as normas brasileiras e/ou internacionais, para atender às demandas como de exportação, por exemplo.

Pretendeu-se com a metodologia criada, determinar os deslocamentos de diversos pontos ao longo do corpo de prova, visando a obtenção de subsídios para futuras pesquisas na área de tecnologia da madeira.

Para tanto, foi realizado um estudo do alvo a ser utilizado, onde se concluiu que o melhor alvo é constituído de um círculo preto, com diâmetro de 0,5 mm, impresso em etiquetas de fundo branco. Estas etiquetas foram coladas na lateral dos



corpos de prova, nas seguintes posições: os dois extremos, alinhados cada um com um apoio; um no centro do vão livre; e os demais com intervalos entre si de 4,5 cm, totalizando 9 alvos, como mostra a Figura 3.1(capítulo 3). Em virtude da configuração da máquina EMIC DI.10000MF, os alvos 8 e 9 não aparecem nas imagens. Este inconveniente é amenizado pela simetria da deformação.

A fim de que coordenadas tridimensionais de alvos pudessem ser determinadas, considerando o aspecto dinâmico do ensaio, seria necessário dispor de, no mínimo, um par de câmeras capazes de tomar imagens sucessivas e simultâneas do fenômeno, sendo desejável três câmeras para viabilizar um controle de resíduos num processo de ajustamento por mínimos quadrados.

A possibilidade, muito desejável, do uso de uma só câmera é que foi determinante para o desenvolvimento de uma nova metodologia.

Um processo dinâmico exige diversas tomadas de imagens, a fim de mapear o movimento. Para tanto, imagens sucessivas, tomadas a intervalos de tempo tais que o fenômeno resulte adequadamente registrado, com a câmera na última posição (frontal) da série de três fotos, feitas para materializar o referencial do espaço objeto. Esse esquema permitiria a determinação da posição e atitude da câmera na posição central, onde ficaria durante todas as experiências realizadas no dia.

Quando os alvos se deslocam segundo uma vertical, como ocorre nos ensaios de flexão, esse conhecimento pode ser usado como injunção às suas coordenadas, num processo de ajustamento por mínimos quadrados, tendo como modelo as equações projetivas. A injunção é no sentido de reproduzir, no modelo matemático, o deslocamento dos alvos segundo a vertical que contém cada um. Tomando como referencial do espaço objeto aquele em que seus eixos X e Y definam um plano vertical, é possível injuncionar a coordenada Z de cada ponto como constante ao longo de cada ensaio (ANDRADE,1977), ou seja, as distâncias de cada alvo ao plano XY não poderão variar, o que garante que as imagens

descreverão um movimento paralelo ao plano XY que é vertical.

O referencial do espaço objeto foi tomado como paralelo ao da terceira foto (frontal), com a câmera nivelada para garantir a verticalidade do eixo Y de seu referencial. As coordenadas do centro de perspectiva ( $x_o$ ,  $y_o$  e  $z_o$ ) e a atitude ( $\Omega$ ,  $\Phi$  e  $K$ ) da câmera também foram determinadas nesse processo.

Deixando como última foto a central e não movendo a câmera, seria possível fazer fotos sucessivas, a curto intervalo de tempo e assim registrar os movimentos dos alvos. Neste processo, uma das coordenadas dos alvos é conhecida – a coordenada Z, que expressa a distância do plano XY ao alvo, medida paralelamente ao eixo óptico da objetiva da câmera.

O sistema de mensuração assim criado deveria ser calibrado, ou seja, a câmera teria que ser calibrada para exatamente as mesmas condições de uso, bem como a posição e atitude da câmera que tomaria as imagens sucessivas para medir os deslocamentos dos alvos.

Entretanto, foi constatado que a câmera se movia um pouco a cada tomada de foto por não haver um sistema de disparo remoto. Ocorreu ainda um acidente, onde o tripé foi tocado, ao término da primeira experiência (E01), movendo sensivelmente a câmera. A solução mais tarde encontrada foi a de não utilizar, a partir das três primeiras fotos feitas para a fototriangulação, o referencial da câmera, mas o referencial materializado pelos alvos fixados na estrutura da máquina de ensaios, que se movimenta de baixo para cima, na velocidade estabelecida.

O referencial assim adotado para o espaço objeto é móvel, o que é inédito em fotogrametria. Como não havia alvos na estrutura da máquina de ensaios, foram usados pontos de uma régua ali existente, gravada de 0,5 em 0,5 polegada, mas numeradas continuamente. Essa régua permitiu ainda o conhecimento de algumas distâncias com elevada precisão. No processo de tomada das três primeiras fotos com o objetivo inicial de determinar a posição e atitude da câmera, as coordenadas de 7 alvos do corpo de prova, bem como alguns pontos sobre a régua permitiu que

se materializasse um referencial fixo à peça móvel da máquina, portanto, um referencial móvel. As distâncias dos diferentes alvos do corpo de prova, que eram as coordenadas **Z** e que seriam consideradas constantes no restante do processo, ficaram também bem determinadas. É curioso notar que o referencial assim materializado, por ser dotado de movimento retilíneo e uniforme, é um referencial inercial.

Os resíduos em **yo** (ordenada do centro de perspectiva da câmera) passaram a mostrar o movimento do referencial e os resíduos em **xo** e **zo** (abscissa e distância) dos pequenos movimentos da câmera acarretados pelo pressionar do botão de disparo.

Duas condições se impunham: a calibração da câmera para as condições de uso ANDRADE (1998 e 2003) e a materialização do referencial do espaço objeto.

As câmeras aerofotogramétricas, por exemplo, são construídas com focalização fixa para o infinito. Mas as câmeras de pequeno formato, em geral, permitem focalizar o objeto, e assim, a distância principal difere da distância focal e uma calibração feita para a câmera focalizada para o infinito só valeria para essa mesma condição.

O ato de focalizar uma câmera de pequeno formato exige movimentos da objetiva, o que faz alterar todas as distorções ópticas de caráter geométrico. Assim, se uma câmera é focalizada para uma distância pequena, de modo que a distância principal não coincida com a distância focal, terá que ser calibrada especificamente para essa condição, para que a sua geometria possa ser conhecida.

No geral, as câmeras de pequeno formato são calibradas para tomar fotos a uma distância grande, como a fachada de um prédio ou um reflorestamento. Nestes casos, a calibração pelo método “On Job Calibration” mostra-se interessante, pois a calibração da câmera estaria sendo realizada para as condições de uso.

O método das Câmeras Convergentes, por sua geometria extremamente forte é o mais adequado. Este método foi combinado com o “On Job Calibration” em

ANDRADE (2001).

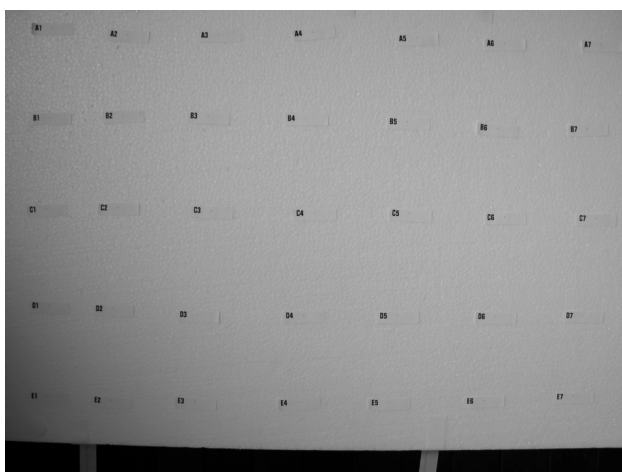
Na proposta desta pesquisa, o objeto a ser fotografado é dinâmico; o espaço para tomar fotos é restrito; o objeto está bem próximo da câmera e não há condições de colocação de alvos em posições e em quantidade adequados para a calibração.

Assim o método dos Alvos Verticais, por exigir grande esforço de trabalho para a instalação dos alvos junto aos experimentos, foi considerado inviável.

Para resolver o problema, a idéia central foi a de reunir as qualidades dos métodos “On Job Calibration” e das Câmeras Convergentes como foi realizado em ANDRADE (2001) e, ao mesmo tempo, materializar um referencial adequado para o espaço objeto.

Tomando as imagens a uma distância de 60 cm, a área fotografada é pouco maior que 50 cm x 70cm. A partir deste dado foi planejado o painel para a calibração da câmera. Foi preparado um painel, Figura 4.1, com alvos em quantidade e demais condições adequadas para a calibração da câmera pelo método das câmeras convergentes.

FIGURA 4.1 – PAINEL COM ALVOS PARA A CALIBRAÇÃO DA CÂMERA



FONTE: O AUTOR (2005)

A Figura 4.1 mostra uma foto frontal do painel de isopor com os seus 35 alvos. Para tornar possível a impressão das fotografias, a resolução das mesmas foi drasticamente diminuída.

As coordenadas dos alvos das imagens tomadas para a calibração (quatro imagens) e as três iniciais dos ensaios para materializar o referencial do espaço objeto foram lidas com o programa “ReadDigiCoord®”. Os dois conjuntos de dados foram processados simultaneamente sob o pressuposto de que os parâmetros de calibração são exatamente os mesmos para todas as imagens.

O registro do tempo com os relógios da câmera e do laboratório, permitiu correlacionar os resultados da experiência, ou seja, tempo e posição num referencial tridimensional móvel.

Entretanto, é importantíssimo lembrar, e com ênfase, que em fotogrametria digital a precisão é função da resolução da imagem, ou seja, do tamanho do pixel; da escala da imagem, ou seja, da distância do objeto e do valor da distância principal; e nos casos dinâmicos, da qualidade do relógio utilizado.

Neste trabalho, a resolução da imagem é de 3,4375 micrometros; distância focal 0,8819 cm; e o relógio com precisão em torno de 1/86400, ou seja, 1 segundo em 1440min. No caso, a velocidade da máquina para os ensaios foi de 14mm/min (0,23mm/s) e cada experiência teve a duração média de 1 minuto. É necessário, entretanto, deixar claro que o menor valor de tempo registrado pelo relógio da câmera é de 1 segundo. Assim, o registro do tempo traria, inerentemente, um erro igual ou inferior a 0,5 segundo, o que corresponde a um deslocamento de 0,12mm de um alvo no experimento. Entretanto, como a câmera só é disparada em segundos inteiros, a precisão do relógio prevalece e também não se acumula nas diferentes tomadas de foto, dada a precisão do relógio.

As fotos para a calibração da câmera foram em número de quatro, segundo o método das câmeras convergentes, ou seja, uma foto central, outra central girada em torno do eixo z da câmera de um ângulo de  $90^0$  e mais duas fotos laterais, convergentes. As quatro fotos da calibração da câmera seriam ajustadas pelo “Bundle Method” junto com as três primeiras fotos que calibrariam o sistema de medida, ou seja, que dariam a posição e atitude da câmera para a tomada das

imagens sucessivas do experimento dinâmico.

Este procedimento teve como características as quatro imagens tomadas do conjunto de alvos para calibração (veja Figura 4.1) e as três tomadas do equipamento (veja Figura 3.1) preparado para o primeiro ensaio. As coordenadas dos alvos das três últimas fotos acima mencionadas, não necessitaram ser corrigidas das distorções da objetiva, pois participaram do processo de calibração.

Deverão ser feitas as correções das distorções da objetiva nas coordenadas de alvos da seqüência de imagens tomadas para registrar o ensaio.

Na seqüência foram tomadas imagens a cada 5 segundos aproximadamente para determinar os movimentos dos alvos nos corpos de prova. As injunções de posição e atitude, nesse procedimento, foram leves o suficiente para permitir o movimento aparente da câmera em relação ao referencial móvel.

Os resíduos da posição e atitude da câmera passaram a retratar, claramente, o movimento vertical do equipamento e até a sua velocidade pode ser calculada, comparada com o valor estabelecido para o ensaio, de 14mm/min e comprovada.

Houve um teste da metodologia proposta e alterações com aperfeiçoamentos importantes, como o da calibração do sistema de mensuração e o da adoção de um referencial móvel ligado à peça móvel do equipamento de ensaio.

No item 4.1 a consolidação da metodologia proposta, com seus aperfeiçoamentos, é explanada minuciosamente. Essa metodologia pode ser aplicada em casos similares onde haja movimentos a serem mensurados, bem como quando a calibração do sistema de mensuração for necessária.

#### 4.1. CONSOLIDAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA

A leitura das coordenadas de foto foi realizada manualmente. Esta tarefa é a única que demandou tempo no processo como trabalhado. Entretanto, esta

dificuldade já é totalmente passível de ser contornada, como já acontece na fotogrametria aérea digital, através dos métodos bem conhecidos como o da correlação de imagens, totalmente comprovado, além de outros muito úteis já consolidados e, ainda outros que estão sofrendo um processo de desenvolvimento.

A não implementação de métodos de medição automática de coordenadas neste trabalho deve-se ao fato de que o objetivo foi outro e que pouco se beneficiaria de tal implementação pelo tempo necessário para tanto. Não obstante, o uso contínuo de tal método só será viável ao se implementar a leitura automática de coordenadas, o que será feito a partir de agora.

O método desenvolvido mostrou-se consolidado em função da resolução das dificuldades que foram sendo constatadas ao desenrolar das pesquisas e é descrito como segue:

1. Antes de acionar a máquina de ensaio, tomar três fotos do experimento, com o corpo de prova do primeiro ensaio. No corpo de prova devem ser colocados alvos adequados para a leitura precisa das suas coordenadas fotogramétricas. A distância de focalização deve ser aproximadamente igual para todas as fotos. As duas primeiras fotos devem ser convergentes para o ponto central do corpo de prova e devem situar-se a uma distância entre si, aproximadamente igual a distância de focalização. A câmera só deve ser focalizada na tomada da primeira foto, visando o alvo central do corpo de prova. A terceira foto é central e aproximadamente perpendicular ao plano que contém os alvos no corpo de prova. Alvos devem ser colocados também no corpo da máquina, para materializar o referencial do espaço objeto;
2. O referencial do espaço objeto é definido como coincidente com o fotogramétrico digital da terceira foto da

fototriangulação e diferem somente pela escala. Tal definição de referencial facilita o cálculo de valores aproximados das coordenadas dos alvos;

3. Mede-se algumas (duas ou mais) distâncias entre alvos que ficarão constantes no processo, para dar escala ao referencial do espaço objeto;
4. Dá-se início ao ensaio, tomando-se fotografias a espaços de tempo aproximadamente regulares;
5. Ao rompimento do corpo de prova cessam as tomadas de fotos e um novo corpo de prova, previamente preparado com alvos, é submetido ao ensaio;
6. A partir desta fase, não é mais necessário repetir a fototriangulação, pois o referencial do espaço objeto está materializado;
7. Após o fim dos ensaios, sem alterar nenhum parâmetro da câmera, fotografa-se um painel com grande quantidade de alvos, segundo o método das câmeras convergentes, para calibrar a câmera. Toma-se, em primeiro lugar uma foto central da mesma distância utilizada no experimento. A segunda foto é tomada do mesmo local, mas com um giro em torno do eixo z da câmera, da ordem de  $90^0$ . As duas últimas fotos são convergentes com a primeira, ou seja, apontando o eixo óptico da câmera para o mesmo ponto e com uma distância entre as câmeras igual a distância de focalização;
8. Mede-se algumas (duas no mínimo) distâncias entre os alvos de calibração, para dar escala ao referencial de calibração;
9. O referencial de calibração é tomado como coincidente com o fotogramétrico digital da primeira foto da calibração e difere



somente pela escala. Tal definição de referencial facilita o cálculo de valores aproximados das coordenadas dos alvos;

10. As coordenadas das quatro fotos da calibração e das três primeiras para a fototriangulação são processadas simultaneamente. Resulta daí o conhecimento dos parâmetros de calibração da câmera, as coordenadas dos alvos utilizados para materializar o referencial do espaço objeto e o referencial da foto central do ensaio, com sua posição (coordenadas  $x_o$ ,  $y_o$ ,  $z_o$ ) conhecida, bem como a sua atitude (ângulos de Euler ao redor dos mesmos eixos –  $\omega$ ,  $\varphi$ , e  $\kappa$ ).
11. Agora, cada foto é processada separadamente, deixando-se a posição e atitude da câmera suficientemente livre (injunção com pesos relativos pequenos), permitindo que os seus resíduos sejam a medida dos movimentos da câmera relativos aos pontos que definiram o referencial do espaço objeto, mas que, na verdade se movimentam verticalmente de baixo para cima a cada ensaio.
12. Calculando as diferenças de coordenadas dos alvos, tomadas a qualquer instante e o instante da primeira foto (antes do início do ensaio) de cada ensaio, bem como as diferenças de tempo, têm-se os dados para construir um gráfico (tempo versus deformação). Se a cada nova experiência forem substituídos os valores da posição e atitude da câmera, os cálculos das deformações ficarão simplificados. Com esse procedimento ficam conhecidos também os movimentos da câmera ao longo da experiência, pois ao manipulá-la, lentamente podemos movê-la. Entre dois ensaios, havendo movimentos da câmera, estes aparecerão como

resíduos de posição ( $x_o, y_o, z_o$ ) ou de atitude ( $\Omega, \Phi, \kappa$ ).

13. Todas as fotos podem ser processadas simultaneamente, com o que se ganha tempo. O fator de maior ganho de tempo será a implementação da leitura automática das coordenadas dos pontos com o algoritmo da correlação ou outros com o mesmo fim.

Especificamente para a câmera utilizada (Coolpix5700) as 7 fotos tomadas para a calibração da câmera e materialização do referencial do espaço objetos foram tomadas no formato HI (tiff). As fotos dinâmicas no formato FI (fine), ou seja, no formato JPEG com compressão igual a 4, para tornar possível a tomada das fotos com cadência de 5 segundos aproximadamente.

## 5. MEDIÇÕES E PROCESSAMENTO DOS DADOS

### 5.1. MEDIÇÕES NO LABORATÓRIO DE TECNOLOGIA DA MADEIRA

Os ensaios realizados na máquina **Emic DL 10000MF** segundo a metodologia **ABIMCI – Flexão Não Estrutural CEN-310**, foram levados a efeito no dia 03 de março de 2004, recebendo, pela sistemática do Laboratório de Tecnologia da Madeira da UFPR, os números de 1701 e 1702. Foram ensaios de Flexão Estática em compensados de 18mm de espessura, no sentido perpendicular – EN 310 . O vão livre foi de 36 cm e a velocidade de 14mm/min. Foram testadas corpos de prova retirados das chapas de compensado com os números 133 e 134 do Laboratório de Tecnologia da Madeira.

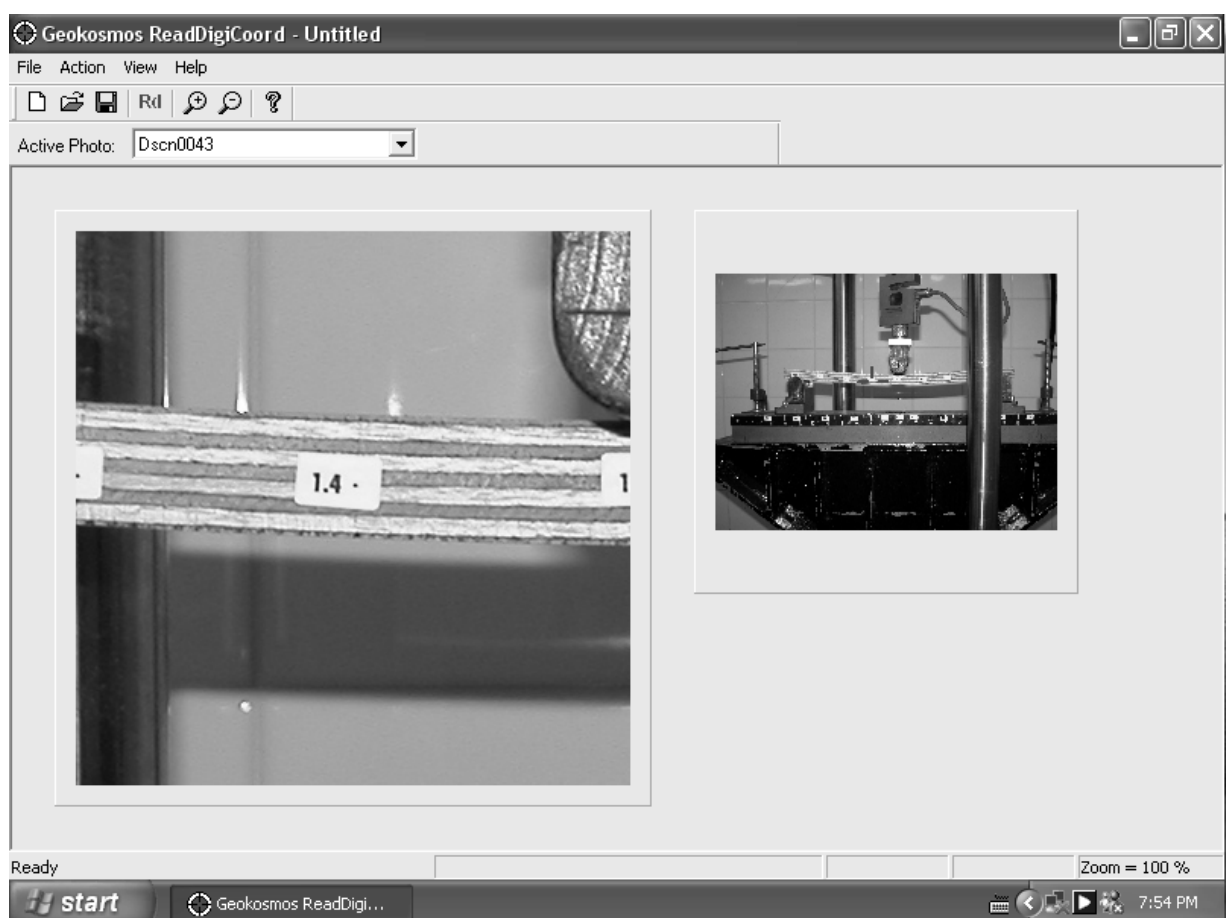
As observações são: as medidas de força, em N; de deformação em mm e de tempo, em segundos, transmitidas em tempo real para um computador pessoal onde um programa processa os dados, criando relatórios e três tipos de gráficos: força x tempo; força x deformação e tempo x deformação, que são mostrados no capítulo 6.

### 5.2. MEDIÇÕES FOTOGRAMÉTRICAS

As medições das coordenadas fotogramétricas e a montagem do respectivo arquivo para fototriangulação foram realizadas como auxílio do programa ReadDigiCoord<sup>®</sup>. Veja Figura 5.1.

O programa ReadDigiCoord<sup>®</sup>, desenvolvido especialmente para este trabalho, cria um dos cinco arquivos que o programa GeoBundle<sup>®</sup> usa – o arquivo denominado \*.tri, que contém as coordenadas de pixel de todos os alvos.

FIGURA 5.1 - TELA DO PROGRAMA DE MEDIÇÃO DE COORDENADAS FOTOGRAMÉTRICAS DE PIXEL



FONTE: O AUTOR (2005)

Os outros quatro arquivos são:

- a) o arquivo **\*.cbt**, que contém o arquivo de câmera com os parâmetros aproximados da calibração da câmera;
- b) o arquivo **\*.eor**, que contém a orientação externa aproximada com os seus desvios padrão e seis “flags” indicando se cada um desses elementos é variável livre ou injuncionada;
- c) o arquivo **\*.ctl** que contém as coordenadas aproximadas dos pontos no espaço objeto, com os

respectivos desvios padrão e com três “flags” para indicar se cada coordenada é variável livre ou injuncionada. O “flag” **0** significa variável livre e **1**, variável injuncionada;

- d) e o arquivo **\*.dis** que serve para injuncionar distâncias conhecidas.

A seguir, um exemplo de cada um desses arquivos:

No arquivo **\*.tri**, aqui denominado **E01CAL.TRI**, que recebeu esse nome para indicar que se trata da experiência **E01CAL**, realizada para calibrar a câmera e ao mesmo tempo materializar o referencial do espaço objeto para todas as experiências. O arquivo completo, com as leituras das coordenadas para calibrar a câmera está no anexo. A parte mostrada na Tabela 5.1 contém as leituras para a materialização do referencial do espaço objeto.

Na primeira coluna da Tabela 5.1, está o nome do experimento ao qual esses dados estão ligados, ou seja, a primeira experiência, denominada **E01**.

A segunda coluna mostra o nome das três imagens, denominadas **DSCN0001**, **DSCN002** e **DSCN003**, tomadas, antes de colocar a máquina de ensaio de flexão para funcionar, para a materialização do referencial do espaço objeto.

A terceira coluna traz o nome do ponto. Os pontos **1**, **2**, **3**, e **4** correspondem aos quatro cantos do bitmap; Os pontos **M7.1** até **M7.7** são os alvos colocados no corpo de prova (O alvo **M7.5** é o central). Em cada experiência o nome variou, mas sempre composto de três dígitos e um ponto. A letra **M** serve para diferenciar dos outros alvos colocados fora do corpo de prova. O primeiro número diferencia as experiências e o último o ponto.

As colunas **4** e **5** mostram as coordenadas de pixel no referencial fotogramétrico de pixel.

TABELA 5.1 – COORDENADAS DE PONTOS FOTOGRAMÉTRICOS PARA FOTOTRIANGULAÇÃO

continua

COORDENADAS DE PONTOS FOTOGRAMÉTRICOS E01CAL.TRI				
Experimento	Imagem	Ponto	X (pixel)	Y (pixel)
E01	DSCN0001	1	0	0
E01	DSCN0001	2	2560	0
E01	DSCN0001	3	0	1920
E01	DSCN0001	4	2560	1920
E01	DSCN0001	M7.1	443	1112
E01	DSCN0001	M7.2	639	1118
E01	DSCN0001	M7.3	837	1118
E01	DSCN0001	M7.4	1025	1122
E01	DSCN0001	M7.5	1211	1126
E01	DSCN0001	M7.6	1384	1124
E01	DSCN0001	M7.7	1554	1125
E01	DSCN0001	F18e	242	777
E01	DSCN0001	F16e	361	782
E01	DSCN0001	F14e	479	786
E01	DSCN0001	F12e	595	793
E01	DSCN0001	F10e	710	797
E01	DSCN0001	F8e	822	803
E01	DSCN0001	F6e	932	808
E01	DSCN0001	F4e	1040	809
E01	DSCN0001	F2e	1146	818
E01	DSCN0001	F0	1251	822
E01	DSCN0001	F2d	1353	826
E01	DSCN0001	F4d	1450	30
E01	DSCN0001	F6d	1546	834
E01	DSCN0001	F8d	1640	839
E01	DSCN0001	F18d	2067	856

TABELA 5.1 – COORDENADAS DE PONTOS FOTOGRAMÉTRICOS PARA FOTOTRIANGULAÇÃO

continuação

COORDENADAS DE PONTOS FOTOGRAMÉTRICOS E01CAL.TRI				
Experimento	Imagem	Ponto	X (pixel)	Y (pixel)
E01	DSCN0002	1	0	0
E01	DSCN0002	2	2560	0
E01	DSCN0002	3	0	1920
E01	DSCN0002	4	2560	1920
E01	DSCN0002	M7.1	682	1111
E01	DSCN0002	M7.2	835	1116
E01	DSCN0002	M7.3	1001	1115
E01	DSCN0002	M7.4	1171	1118
E01	DSCN0002	M7.5	1352	1121
E01	DSCN0002	M7.6	1534	1119
E01	DSCN0002	M7.7	1726	1119
E01	DSCN0002	F18e	496	833
E01	DSCN0002	F16e	580	831
E01	DSCN0002	F14e	667	830
E01	DSCN0002	F12e	757	827
E01	DSCN0002	F10e	850	825
E01	DSCN0002	F8e	944	823
E01	DSCN0002	F6e	1042	822
E01	DSCN0002	F4e	1142	817
E01	DSCN0002	F2e	1244	818
E01	DSCN0002	F0	1349	815
E01	DSCN0002	F2d	1454	812
E01	DSCN0002	F4d	1563	809
E01	DSCN0002	F6d	1672	807
E01	DSCN0002	F16d	2244	793
E01	DSCN0002	F18d	2362	791

TABELA 5.1 – COORDENADAS DE PONTOS FOTOGRAMÉTRICOS PARA FOTOTRIANGULAÇÃO

conclusão				
COORDENADAS DE PONTOS FOTOGRAMÉTRICOS EO1 CAL.TRI				
Experimento	Imagem	Ponto	X (pixel)	Y (pixel)
E01	DSCN0003	1	0	0
E01	DSCN0003	2	2560	0
E01	DSCN0003	3	0	1920
E01	DSCN0003	4	2560	1920
E01	DSCN0003	M7.1	770	1108
E01	DSCN0003	M7.2	954	1113
E01	DSCN0003	M7.3	1146	1112
E01	DSCN0003	M7.4	1337	1115
E01	DSCN0003	M7.5	1533	1119
E01	DSCN0003	M7.6	1725	1116
E01	DSCN0003	M7.7	1919	1115
E01	DSCN0003	F18e	565	797
E01	DSCN0003	F16e	670	796
E01	DSCN0003	F14e	777	796
E01	DSCN0003	F12e	885	798
E01	DSCN0003	F10e	995	797
E01	DSCN0003	F8e	1105	798
E01	DSCN0003	F6e	1217	798
E01	DSCN0003	F4e	1328	796
E01	DSCN0003	F2e	1440	800
E01	DSCN0003	F0	1554	801
E01	DSCN0003	F2d	1665	800
E01	DSCN0003	F4d	1777	801
E01	DSCN0003	F6d	1888	800
E01	DSCN0003	F8d	1998	801
E01	DSCN0003	F16d	2434	803
E01	DSCN0003	F18d	2540	803

A Tabela 5.2 mostra os valores aproximados dos elementos de orientação externa. Neste exemplo, as três linhas correspondem às três fotos tomadas para materializar o referencial do espaço objeto.

A primeira coluna traz o nome do experimento associado com o nome abreviado da imagem (DSCN01 passou a ser simplesmente D01).

As três colunas seguintes (2, 3 e 4) mostram os valores aproximados das coordenadas do centro perspectivo de cada foto em cm.

As colunas 5, 6 e 7 mostram os ângulos de Euler na seguinte ordem:  $\omega$ ,  $\varphi$  e  $\kappa$ , dados em graus sexagesimais.



As colunas 8, 9, 10, 11, 12 e 13 mostram o desvio padrão dos seis elementos de orientação externa, nas 6 colunas anteriores.

As colunas 14 a 19 são “flags”, indicam se a variável é livre (0) ou injuncionada (1).

TABELA 5.2 – VALORES APROXIMADOS DA ORIENTAÇÃO EXTERNA , DESVIO PADRÃO E FLAGS

Orientação externa <b>E01Cal.eor</b>																	
Imagem	Posição (m)			Atitude (°)			Desvio Padrão						Flag				
Exp_Fot	X	Y	Z	$\omega$	$\Phi$	$\kappa$	dpx	dpy	dpz	$dp\omega$	$dp\phi$	$dp\kappa$	fx	fy	fz	$f\omega$	$F\phi$ fk
E01_D01	-12.000	18.000	0.0	0.0	-20.0	0.0	0.0	0.00	0.0	0.000	0.000	0.000	0	0	0	0	0
E01_D02	37.000	18.000	0.0	0.0	12.0	0.0	0.0	0.00	0.0	0.000	0.000	0.000	0	0	0	0	0
E01_D03	23.355	17.516	0.0	0.0	0.0	0.0	0.01	0.01	0.01	0.001	0.001	0.001	1	1	1	1	1

A Tabela 5.3 contém os valores aproximados das coordenadas dos alvos no referencial do espaço objeto, dados em cm, os respectivos desvios padrão, no caso unitários porque um valor positivo tem que ser dado, mas como os “flags” nas três colunas seguintes são nulos, nenhum ponto foi injuncionado. Quando o “flag” é igual a 1, a variável é injuncionada segundo o desvio padrão correspondente.

TABELA 5.3 - ARQUIVO DE PONTOS DO ESPAÇO OBJETO - **E01CAL.CTL**

Ponto	X	Y	Z	Desvio Padrão			FLAGS		
M7.1	14.06	20.22	-60.00	1	1	1	0	0	0
M7.2	17.41	20.31	-60.00	1	1	1	0	0	0
M7.3	20.92	20.30	-60.00	1	1	1	0	0	0
M7.4	24.41	20.35	-60.00	1	1	1	0	0	0
M7.5	27.99	20.40	-60.00	1	1	1	0	0	0
M7.6	31.47	20.36	-60.00	1	1	1	0	0	0
M7.7	35.02	20.35	-60.00	1	1	1	0	0	0
F18e	10.34	13.84	-60.00	1	1	1	0	0	0
F16e	12.26	13.84	-60.00	1	1	1	0	0	0
F14e	14.20	13.85	-60.00	1	1	1	0	0	0
F12e	16.17	13.84	-60.00	1	1	1	0	0	0
F10e	18.16	13.84	-60.00	1	1	1	0	0	0
F8e	20.19	13.81	-60.00	1	1	1	0	0	0
F6	22.21	13.85	-60.00	1	1	1	0	0	0
F4e	24.25	13.86	-60.00	1	1	1	0	0	0
F2e	26.29	13.88	-60.00	1	1	1	0	0	0
F0	28.35	13.87	-60.00	1	1	1	0	0	0
F2d	30.50	13.86	-60.00	1	1	1	0	0	0
F4d	32.42	13.85	-60.00	1	1	1	0	0	0
F6d	34.45	13.86	-60.00	1	1	1	0	0	0
F8d	36.47	13.87	-60.00	1	1	1	0	0	0
F16d	44.38	13.90	-60.00	1	1	1	0	0	0
F18d	46.34	13.91	-60.00	1	1	1	0	0	0

A Tabela 5.4 mostra os dados do arquivo de distâncias que foram injuncionadas.

5.4 - ARQUIVO DE DISTÂNCIAS - **EXP030304.DIS**

Ponto 1	Ponto 2	Dist. 1-2 (cm)	DP (cm)
F18e	F18d	45.72	0.03
F16e	F6d	27.94	0.03
F0	F14e	17.78	0.03
F18e	F16d	43.18	0.03
F16e	F8d	30.48	0.03
F16e	F10d	30.02	0.03
F14e	F18d	40.64	0.03

Na primeira e segunda coluna da Tabela 5.4 os nomes dos pontos que definem a distância medida.

A terceira coluna o valor da distância em cm e na terceira o desvio padrão da distância medida. As distâncias aqui utilizadas foram tomadas de uma escala em 0,5 polegada existente na máquina de ensaio e cuja imagem resultou muito boa, dispensando tarjetas.

O arquivo de câmera, mostrado na Figura 5.2, é preenchido em tela do programa GeoBundle® e contém o nome da câmera, modelo, coordenadas dos pontos definidores do referencial fotogramétrico (marcas fiduciais, no caso de câmeras analógicas) e os demais parâmetros que são determinados num processo de calibração: distância principal; coordenadas **xo** e **yo** do ponto principal de fotogrametria; coeficientes da distorção radial simétrica: **k0**, **k1**, **k2**, **k3** e coeficientes da distorção descentrada: **P1**, **P2**.

FIGURA 5.2 ARQUIVO DE CÂMERA - COOLPIX5700.CBT

**Edit Camera File**

Camera Name:  Date of last calibration:

Camera Parameters

Focal Distance:  mm Cx:  mm Cy:  mm

Fiducial Marks

Point #1 => x:  mm y:  mm

Point #2 => x:  mm y:  mm

Point #3 => x:  mm y:  mm

Point #4 => x:  mm y:  mm

Distortion Parameters

K0:

K1:

K2:

K3:

P1:

P2:

Camera Type

Refraction factor:

FONTE: O AUTOR (2005)

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 6.1. RELATÓRIOS DO LABORATÓRIO DE TECNOLOGIA DA MADEIRA

Os relatórios do Laboratório de Tecnologia da Madeira são padronizados e trazem, entre outras informações ligadas às normas que regem os ensaios, as seguintes: Módulo de Ruptura; Módulo de Elasticidade; Força Máxima; e Deformação no ponto de aplicação da força, conforme a Tabela 6.1.

Fazem parte ainda do relatório, os gráficos de força versus tempo; força versus deformação; e tempo versus deformação, conforme Figuras 6.1, 6.2 e 6.3.

TABELA 6.1 – RELATÓRIO DE ENSAIO DE FLEXÃO ESTÁTICA

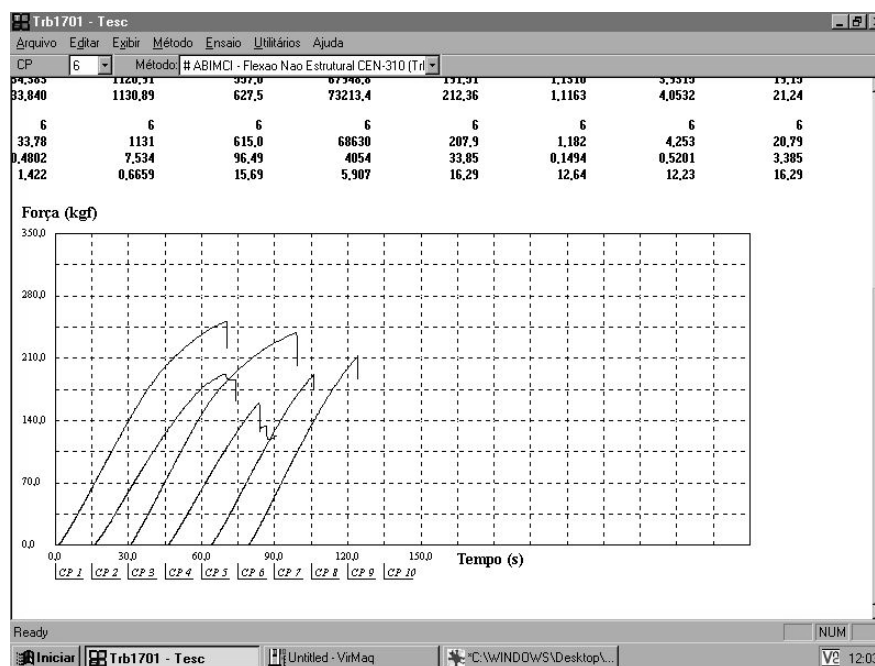
Ensaio de Flexão Estática							
Compensados de 18mm – Sentido Perpendicular – EN 310							
Relatório de Ensaio							
Máquina: Emic DI.10000MF		Célula: Trd 26	Data: 03/03/2004	Hora: 10:40:37	Trabalho nº 1701		
Programa: Tesc versão 1.08		Método de Ensaio: ABIMCI – Flexão não estrutural CEN-310					
Ident. Amostra>>>>>Vão: 360.00 mm Velocidade 14mm/min N° da Chapa: 133							
Seção Inicial (mm <sup>2</sup> )	Comprimento Base (mm)	Modulo Ruptura (kg/cm <sup>2</sup> )	Modulo Elasticidade (kg/cm <sup>2</sup> )	Força Máxima (kgf)	Deform 10% (mm)	Deform 40% (mm)	Força 10% (kgf)
1) 34.251	1124.41	734.3	71837.8	251.50	1.4011	4.9055	25.15
2) 33.197	1139.04	579.2	62806.3	192.28	1.2076	4.3986	19.23
3) 33.661	1134.45	711.7	70786.0	239.55	1.2706	4.7174	23.96
4) 33.322	1138.04	480.2	65188.6	160.00	0.9627	3.5137	16.00
5) 34.383	1120.91	557.0	67948.8	191.51	1.1310	3.9315	19.15
6) 33.840	1130.09	627.5	73213.4	212.36	1.1163	4.0532	21.24
6	6	6	6	6	6	6	6
33.78	1131	615.0	68630	207.9	1.182	4.253	20.79
0.4802	7.534	96.49	4054	33.85	0.1494	0.5201	3.385
1.422	0.6659	15.69	5.907	16.29	12.64	12.23	16.29

FONTE: LABORATÓRIO DE TECNOLOGIA DA MADEIRA DA UFPR

O gráfico da Figura 6.1 mostra que há linearidade na variação do tempo com a força aplicada e isso é perfeitamente compreensível, pois a máquina é acionada para movimentar-se a uma velocidade constante, escolhida a priori, no caso, 14mm/min. A partir de um ponto, o gráfico deixa de ser linear, mostrando que o tempo cresce mais rápido que o incremento de força e finalmente o gráfico decai

quando ocorre a ruptura do corpo de prova. A força está expressa em kgf e o tempo em segundos.

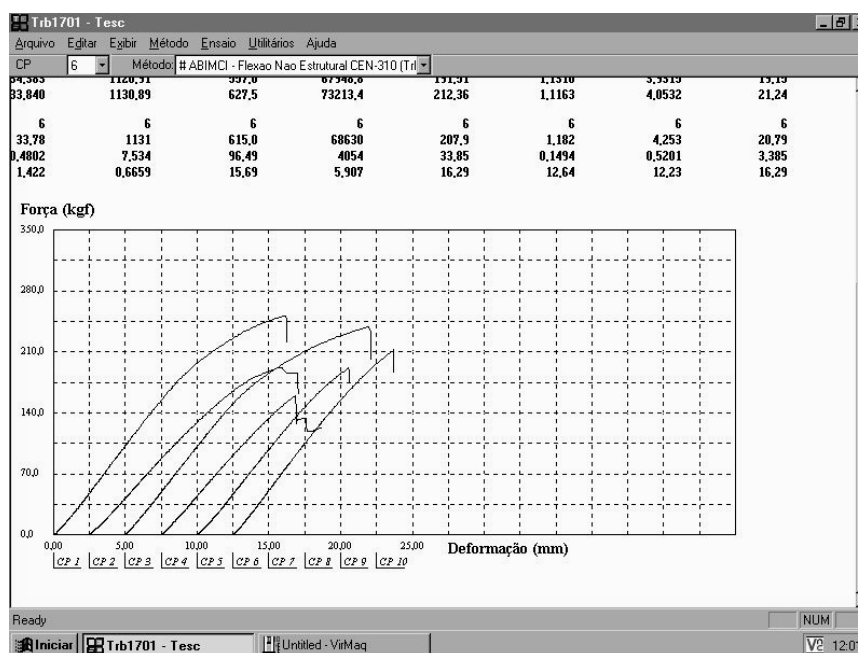
FIGURA 6.1 – FORÇA VERSUS TEMPO



FONTE: LABORATÓRIO DE TECNOLOGIA DA MADEIRA DA UFPR

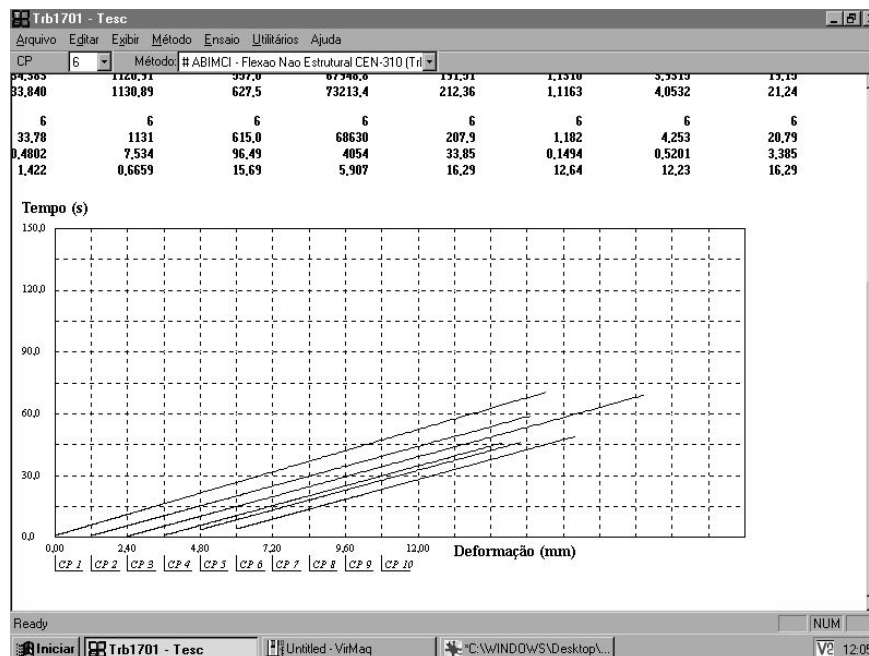
O gráfico da Figura 6.2, como o anterior, mostra uma dependência linear entre a força e a deformação, até um determinado valor, a partir do qual o corpo de prova se deforma mais rapidamente do que os incrementos de força, em consonância do que se espera da teoria. Ao fim, o gráfico decai, quando ocorre a ruptura do corpo de prova. No trecho linear, temos que a Lei de Hooke é atendida. A força está expressa em kgf e as deformações em mm.

FIGURA 6.2 – FORÇA VERSUS DEFORMAÇÃO



FONTE: LABORATÓRIO DE TECNOLOGIA DA MADEIRA DA UFPR

FIGURA 6.3 – TEMPO VERSUS DEFORMAÇÃO



FONTE: LABORATÓRIO DE TECNOLOGIA DA MADEIRA

O gráfico da Figura 6.3 mostra a variação temporal da deformação. Como esperado, trata-se de um gráfico linear, pois é fruto da velocidade escolhida para o funcionamento da máquina (14mm/s).

## 6.2. RELATÓRIOS DA PESQUISA FOTOGRAMÉTRICA

A seguir, neste capítulo, em benefício da clareza, são mostrados apenas resultados representativos da totalidade das experiências realizadas, ficando no anexo o restante delas de forma integral. Como todas as experiências mostraram resultados totalmente consistentes, essa prática é adequada por permitir maior facilidade de compreensão.

### 6.2.1. Calibração do Sistema de Mensuração

Os resultados da calibração do sistema, que consiste na calibração da câmera com a determinação simultânea do referencial do espaço objeto, estão expostos a seguir:

A Figura 6.4 mostra o gráfico de distorção radial simétrica em unidades de pixel versus pixel.

Resultados da Calibração e do Referencial Espaço Objeto:

#### Calibration Report - \_Coolpix5700

Calibration Date: October 11, 2004 12:40:26

No. of photos: 7

No. of points: 58

Total of images: 197

No. of distances: 10

A priori Variance: 1.00000

A posteriori Variance: 0.64270

Chi Squared: 128.540168

Degrees of Freedom: 200

Refraction: 0.0000000e+000 SDev: 0.0000000e+000

#### Gaussian values:

Focal Distance: 2593.8692 pixel SDev: 0.857 pixel

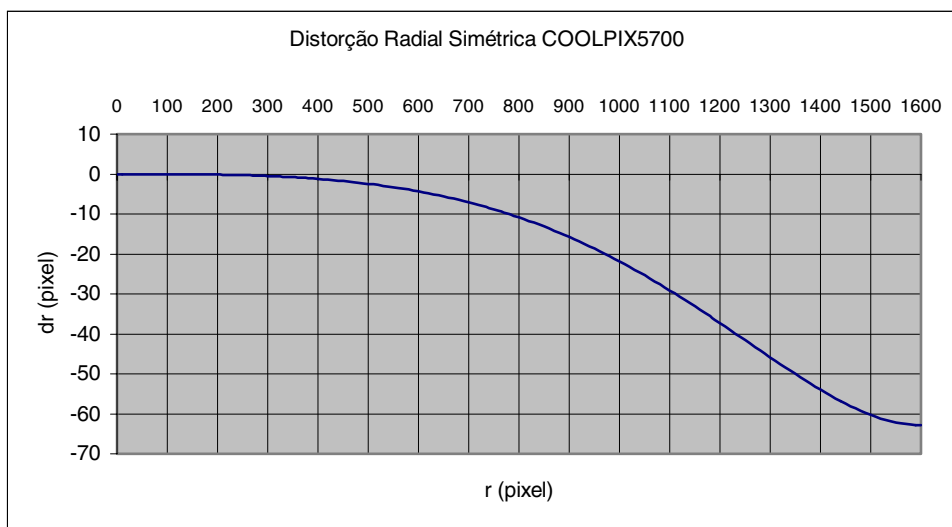
xo: 1280.0078 pixel SDev: 0.856pixel

yo: 960.0319 pixel SDev: 0.857 pixel

K1: -1.5385112e-008      SDev: 7.3200225e-010  
 K2: -7.5761912e-015      SDev: 4.1894361e-016  
 K3: 3.0373188e-021      SDev: 1.5281948e-022

P1: -1.0710069e-007      SDev: 5.9530800e-008  
 P2: -2.8999968e-007      SDev: 5.9478806e-008

FIGURA 6.4 CURVA DE DISTORÇÃO RADIAL SIMÉTRICA



FONTE: AUTOR (2005)

### 6.2.2. Coordenadas Temporais dos Alvos

Com a metodologia desenvolvida determinou-se, para cada instante, e a um intervalo de aproximadamente 5 segundos, as coordenadas **X**, **Y** e **Z** de sete alvos dispostos nos corpos de prova, sendo um ponto situado sobre o apoio da esquerda e o ponto 5 sempre no centro do vão, onde a força central é aplicada.

A Tabela 6.2 mostra o instante em que a imagem foi tomada, o nome e as coordenadas dos 7 pontos no corpo de prova e de 6 do conjunto de 16 pontos que materializam o referencial do espaço objeto. As coordenadas Z de todos os pontos também materializam o referencial do espaço objeto. O nome do ponto é composto do nome abreviado da imagem – D34, no exemplo; da letra M, para designar ponto



móvel, isto é, passível de movimento em virtude de deformação da peça; e do nome do ponto como aparece na tarjeta – 1.1, ... 1.7 na Tabela 6.2. No segundo experimento o primeiro dígito seria 2 – então 2.1, e assim por diante. As três últimas colunas mostram as coordenadas tridimensionais ajustadas de cada alvo no instante 10 h:09min:11s. No mesmo experimento os valores de Z ficam invariáveis com o tempo, pois cada alvo desloca-se segundo uma vertical. E isso, permite injuncionar Z ao longo do tempo, para ajudar a materializar o referencial do espaço objeto.

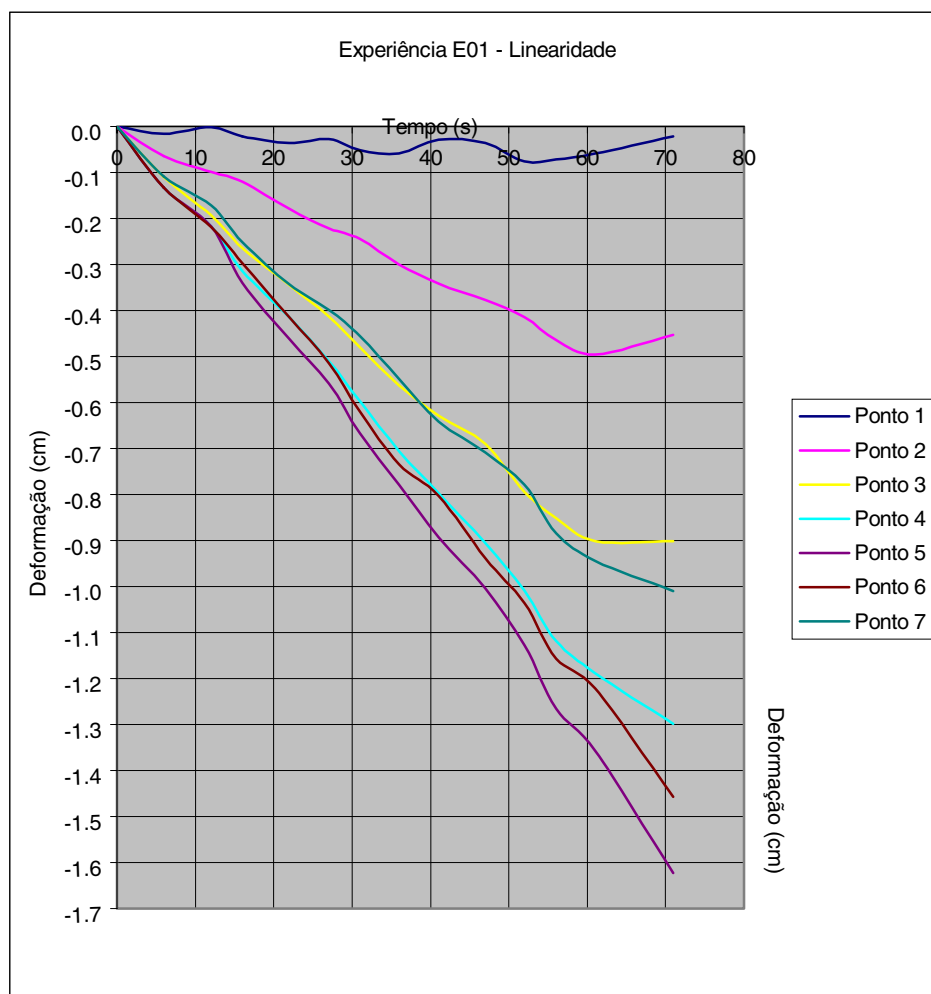
TABELA 6.2 – COORDENADAS AJUSTADAS DE PONTOS NA IMAGEM D34

Tempo	Ponto	X	Y	Z
10: 09: 11	D34M1.1	11.007	21.096	-61.310
	D34M1.2	15.521	21.179	-61.116
	D34M1.3	20.231	20.957	-60.916
	D34M1.4	24.583	21.027	-60.730
	D34M1.5	29.378	21.169	-60.518
	D34M1.6	33.871	21.153	-60.331
	D34M1.7	38.289	21.163	-60.116
	F18e	6.802	13.749	-59.550
	F16e	9.305	13.760	-59.424
	F0	29.601	13.888	-58.862
	F6d	37.236	13.908	-58.635
	F16d	49.955	13.921	-58.256
	F18d	52.503	13.924	-58.233

### 6.2.3. Deslocamento dos Alvos

A Figura 6.5 mostra a linearidade da deformação com o tempo em todos os pontos. No ponto central (ponto 5), tal linearidade foi consequência da velocidade constante da máquina. É interessante observar que o mesmo comportamento ocorre nos demais pontos, apenas, como era esperado, com coeficiente angular menor. É ainda notório que os pontos simétricos (3 e 7) e (4 e 6) tiveram curvas, do ponto de vista prático, coincidentes, mostrando um comportamento uniforme e simétrico do corpo de prova, com pequeníssimas variações em virtude da natural não homogeneidade do corpo de prova.

FIGURA 6.5 – GRÁFICO DO TEMPO (S) X DEFORMAÇÃO (CM) – FOTOGRAMETRIA



FONTE: O AUTOR (2005)

O ponto (1), situado sobre o apoio da esquerda mostrou variações menores que 1mm (algo com valor máximo da ordem de 0,8mm), decorrentes dos movimentos do corpo de prova neste ponto para a sua acomodação em face dos esforços. As sete séries na Figura 6.5 representam os sete alvos onde as mensurações foram realizadas.

O corpo de prova rompeu aos 60 segundos, aproximadamente. Com isso, os pontos mostraram retorno, ou seja, a viga retraiu-se ao ser aliviada da carga. Este fato pode ser visualizado no gráfico da Figura 6.5.

#### 6.2.4. Variação Temporal da Linha Elástica

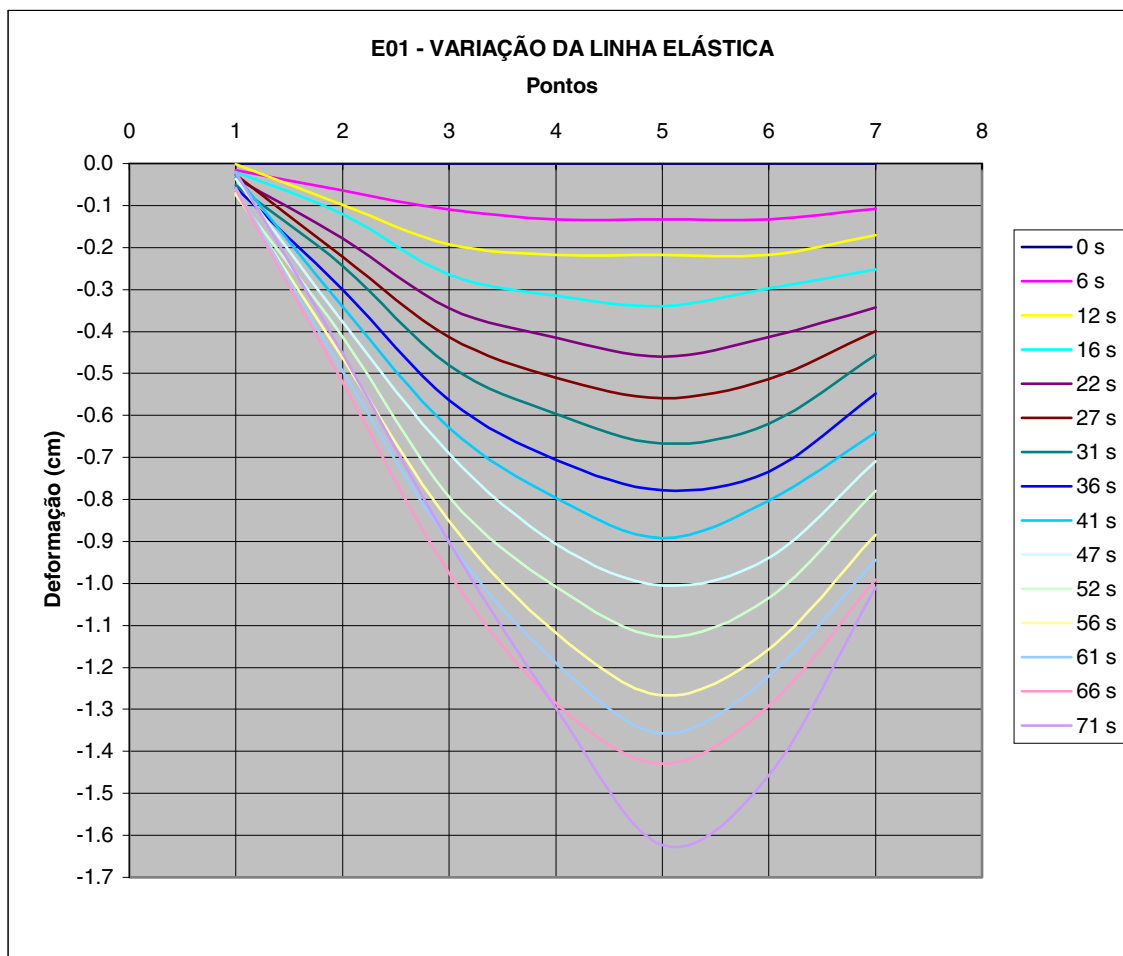
A Figura 6.6 mostra a variação da linha elástica do corpo de prova com o tempo na experiência E01. A linha elástica mensurada está desenhada em cores diferentes, correspondentes ao instante em que as imagens foram tomadas, conforme indica a legenda contida no lado direito da figura.

O ponto 5 situa-se no centro da peça ensaiada. Percebe-se, entretanto, que os pontos 4 e 6 sofreram a mesma deformação que o ponto 5 até os 12 segundos. A partir daí, o ponto 5 passou a apresentar a maior deformação. Aos 71 segundos, a peça já rompida mostrou retrocesso dos pontos, cruzando as curvas de tempos anteriores.

É ainda notório a acentuação da simetria das deformações ao correr do tempo, mostrando que com o aumento das solicitações, as propriedades elásticas se mostraram mais parecidas com o comportamento teórico esperado. Este fato sugere que pequenas diferenças nas propriedades elásticas nos diferentes pontos da peça têm mais efeito nas pequenas solicitações de forças, ou seja, a uniformidade das propriedades elásticas da peça são mais evidentes nas altas solicitações.

A Figura anterior, a 6.5, mostra a tendência linear das deformações com o tempo. Isto é mais evidente nos pontos mais próximos do centro da peça que foi submetida a esforço de flexão com força aplicada no centro da peça. Os pontos mais próximos dos apoios mostraram maiores movimentos na direção horizontal. Tais movimentos refletem mais o resultado da deformação da peça como um todo e foram de caráter quase aleatório e de pequeno valor, inferior a 1 mm. A curva que descreve esses pequenos movimentos segundo a horizontal, não tem caráter sistemático e mostra ser apenas uma adaptação da peça, que é simplesmente apoiada próximo de seus extremos e tende, por isso, a deslizar sobre os apoios com as deformações da peça como um todo.

FIGURA 6.6 – GRÁFICO DA VARIAÇÃO TEMPORAL DA LINHA ELÁSTICA – E01



FONTE: O AUTOR (2005)

A Tabela 6.3, mostra os valores dos resíduos das coordenadas do centro perspectivo da câmera nos instantes das tomadas das 15 imagens da experiência E01. Os valores dos resíduos em **xo** (RX) e em **zo** (RZ) não se mostram tendenciosos, mas os resíduos em **yo** (RY), mostram variação linear.

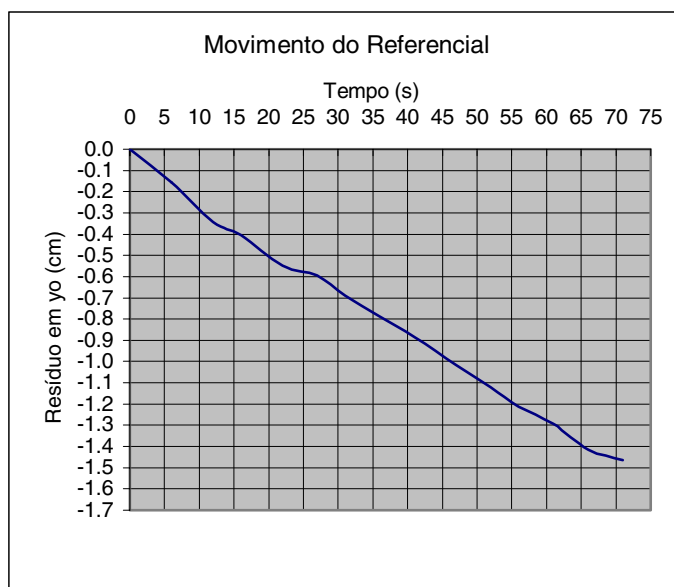
Como foi explicado, em virtude do referencial do espaço objeto mover-se verticalmente, a coordenada y do centro perspectivo varia no sentido oposto. Desta forma, o resíduo RY calculado no ajustamento para o instante 08:55:00 de -1,548 cm, significa que o referencial subiu +1,548 cm desde o tempo tomado como origem 08:53:54, o que condiz com a velocidade adotada para a máquina nesse ensaio. Com base nesses valores, a velocidade medida da máquina seria de 13 mm/min.

TABELA 6.3 - RESÍDUOS NAS COORDENADAS DOS CENTROS DE PERSPECTIVA EM E01

Tempo	RX (cm)	RY (cm)	RZ (cm)	Dt (s)	dry (cm)
08:53:54	0.109	<b>-0.134</b>	-0.014	0	<b>0.000</b>
54:00	0.080	<b>-0.289</b>	-0.037	6	<b>-0.155</b>
06	-0.027	<b>-0.477</b>	-0.075	12	<b>-0.343</b>
10	0.078	<b>-0.537</b>	-0.031	16	<b>-0.403</b>
16	-0.079	<b>-0.681</b>	-0.045	22	<b>-0.547</b>
21	0.004	<b>-0.729</b>	-0.028	27	<b>-0.595</b>
25	0.081	<b>-0.822</b>	-0.031	31	<b>-0.688</b>
30	0.061	<b>-0.922</b>	-0.073	36	<b>-0.788</b>
35	-0.136	<b>-1.020</b>	-0.098	41	<b>-0.886</b>
41	0.205	<b>-1.150</b>	-0.066	47	<b>-1.016</b>
46	0.004	<b>-1.254</b>	-0.025	52	<b>-1.120</b>
50	0.181	<b>-1.347</b>	-0.084	56	<b>-1.213</b>
55	0.086	<b>-1.428</b>	-0.104	61	<b>-1.294</b>
55:00	0.082	<b>-1.548</b>	-0.102	66	<b>-1.414</b>
05	-0.026	<b>-1.597</b>	-0.137	71	<b>-1.463</b>

A figura 6.7 mostra a variação com o tempo do resíduo da coordenada **yo** do centro de perspectiva, que corresponde ao movimento (com sinal contrário) da máquina de ensaio.

FIGURA 6.7 RESÍDUO EM Y0 DO CENTROS DE PERSPECTIVA EM E01



FONTE: O AUTOR (2005)

Os resíduos em **xo** e **zo** são puro ruído das observações, mas podem conter uma pequena componente de movimento da câmera. Em virtude de seus

valores serem, na maioria dos casos, bem inferiores a 1 desvio padrão, podem ter ocorrido aleatoriamente.

Observa-se a coerência dos valores desse gráfico (Figura 6.7) com os gráficos mostrados nas Figuras 6.4 e 6.5.

### 6.2.5. Determinações do Módulo de Young

As equações (2.3) e (2.4) podem ser utilizadas para determinar o valor do módulo de Young quando um ensaio de flexão é realizado, pois são conhecidos os valores de P, de l, de J e os diferentes valores de x onde a deformação Y for medida. A quantidade enorme de mensurações permite um ajustamento por mínimos quadrados e assim, o valor mais provável de E poderá ser determinado.

Por exemplo, tomando a (2.6), podemos calcular o momento de inércia da peça para a posição em que é solicitada no ensaio de flexão:

$$J = \frac{5 \text{ cm} \times (1,8 \text{ cm})^3}{12} = 2,43 \text{ cm}^4$$

Com a (2.5), calculamos o valor do Módulo de Young com dados correspondentes ao tempo de 41 segundos na experiência E01, onde a força ainda aumentava linearmente com a deformação do ponto 5 (central – sob a força aplicada, ou seja a 18cm dos apoios):

$$E = \frac{163 \text{ kgf} \times 36^3 \text{ cm}^3}{48 \times 0,89 \text{ cm} \times 2,43 \text{ cm}^4} = 73258,4 \text{ kgf/cm}^2$$

No ponto 4, situado a 4,5cm à esquerda do ponto central, com a coordenada x = 13,5cm (com origem no apoio da esquerda), a (2.3) nos dá:

$$E = \frac{-4 * 163\text{kgf} * 13,5^3 \text{cm}^3 + 3 * 163\text{kgf} * 36^2 \text{cm}^2 * 13,5\text{cm}}{48 * 2,43\text{cm}^4 * 0.80\text{cm}} = 74496,1\text{kgf/cm}^2$$

Tais exemplos mostram o enorme potencial de estudos propiciados pelo acesso aos dados obtidos ao longo do corpo de prova.

## 7. CONCLUSÕES

### 7.1. CALIBRAÇÃO DO SISTEMA DE MENSURAÇÃO

Os dados para a fototriangulação e para a calibração da câmera foram obtidos em local e tempo diferentes, mas processados simultaneamente em bloco, num método que pode ser designado como **Calibração Aplicada**. Tal denominação enfatiza o fato de se processar dados específicos de calibração simultaneamente com os da fototriangulação, viabilizando um **Sistema de Mensuração** muito robusto.

A condição para a execução do método é que as fotos tomadas para a calibração sejam realizadas sem que se alterem os parâmetros da câmera, como focalização, distância do objeto e outros que a câmera permita mudar. O esquema para a tomada das fotos para a calibração deve ser aquele do método de calibração eleito para o caso. Aqui, foi escolhido o **Método das Câmeras Convergentes** por sua substancial robustez e adequação para o tipo de problema.

A **Calibração Aplicada** do Sistema de Mensuração dá à Fotogrametria à Curta Distância o potencial de se utilizar câmeras, cuja objetiva esteja focalizada para qualquer distância do objeto a ser fotografado. O processamento simultâneo dá maior generalidade à solução e ao mesmo tempo, maior rigidez aos resultados. Outra característica do método é a de não exigir a correção das coordenadas de foto das distorções das lentes, pois os coeficientes das curvas de distorções ópticas são parâmetros incógnitos no modelo matemático utilizado.

### 7.2. MEDIÇÕES DINÂMICAS

A obtenção de dados fotogramétricos para medidas dinâmicas, ou seja, de objetos em movimento, exige a tomada simultânea de, no mínimo, um par de fotografias. Esse procedimento pode apresentar ótimos resultados, mas exige duas



ou mais câmeras tomando fotos simultaneamente e, naturalmente, o processamento dos dados gerados por todas as imagens tomadas.

A vantagem, neste trabalho, foi a de desenvolver metodologia para o uso, em todo o processo, de apenas uma câmera fotográfica.

De início, a viabilização dessa idéia seria através da fixação da posição e atitude da câmera depois de determinados pela fototriangulação inicial. Tal idéia, embora experimentada, não foi cabível, pois foram constatados movimentos da câmera por esta não possuir um mecanismo de disparo remoto. Essa metodologia, entretanto, continua válida para as condições em que foi idealizada.

Constatado que a câmera poderia sofrer pequenos deslocamentos e que os alvos colocados na peça que contém os apoios para o corpo de prova se movem com ela verticalmente, foi imaginado adotar o referencial do espaço objeto materializado pelos alvos nessa peça. Assim, o referencial seria móvel, permanecendo constantes as coordenadas dos seus alvos durante cada ensaio. Tal referencial, mesmo sendo móvel mostrou-se o mais adequado para o caso, pois interessava conhecer as variações de coordenadas exatamente em relação a ele.

Movendo-se o referencial segundo o eixo vertical  $y$ , a coordenada  $y_0$  do centro de perspectiva da câmera teria que variar, diminuindo o seu valor com a mesma velocidade que o referencial subia, ou seja na razão de 14mm/min.

As coordenadas dos alvos no corpo de prova refletiram as deformações sofridas nas posições dos mesmos, no instante da tomada de cada imagem. Ao colocar os resultados em gráfico, estamos mapeando a linha elástica ao longo do tempo. Em outras palavras, os alvos colocados no corpo de prova tiveram os seus valores de  $y$  diminuídos a cada imagem tomada, segundo a deformação temporal da linha elástica.

Os resíduos nas coordenadas de posição da câmera são a medida dos movimentos da mesma em relação ao referencial dinâmico.

Ao conjunto de todos os procedimentos adotados denominou-se **Método**

**de Mensuração Dinâmica.** Esta metodologia funcionou com total sucesso.

No exemplo presente, cada alvo colocado na peça a ser ensaiada desloca-se segundo um plano vertical paralelo ao plano XY do referencial, podendo variar apenas as coordenadas Y (segundo a vertical) e X (segundo a horizontal). Desta forma, podem ser injuncionados todos os pontos que materializam o referencial em suas três coordenadas e, cada ponto móvel com a coordenada Z. Isto permitiu que um processo contínuo de determinação de posição e atitude da câmera, com uma única imagem fotográfica, fosse possível.

Quando a câmera permanece totalmente imóvel, a posição e atitude também permanecem conhecidas, porém, tal condição não é necessária para o método produzir resultados corretos. A precisão alcançada nas experiências mostrou que a metodologia foi perfeitamente adequada para as exigências requeridas nesses tipos de ensaio, naquilo que se propõe, ou seja, na determinação precisa do deslocamento de alvos colados em locais escolhidos do corpo de prova.

Entretanto, é importantíssimo lembrar, e com ênfase, que em fotogrametria digital a precisão é função da resolução da imagem, ou seja, do tamanho do pixel; da escala da imagem, ou seja, da distância do objeto e do valor da distância principal; e nos casos dinâmicos, da qualidade do relógio utilizado.

Neste trabalho, a resolução da imagem foi de 3,4375  $\mu\text{m}$ ; a distância focal 8,819 mm; e o relógio da câmera tem precisão de 1/86400.

A velocidade da máquina para os ensaios foi de 14mm/min (0,23mm/s) e cada experiência teve a duração média de 1 minuto. É necessário, entretanto, deixar claro que o menor valor de tempo registrado pelo relógio da câmera é de 1 segundo. Assim, o registro do tempo traria, inerentemente, um erro igual ou inferior a 0,5 segundo, o que corresponderia a uma discrepância de até 0,12mm de um alvo. Entretanto, como a câmera só é disparada em segundos inteiros, prevalece a precisão do relógio que em 1 minuto poderia estar errado em 0,00069 s.

## 8. CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES

Toda a metodologia aqui proposta e testada mostrou-se viável e de fácil execução.

Na condução dos trabalhos de pesquisas, entretanto, gastou-se um tempo muito grande comparado com os necessários para produzir. Isso resulta do fato de que as pesquisas exigem um tempo não definido para estudos, leituras, criação e testes. Este tempo é fundamental e de enorme valia para auferir-se resultados promissores.

Descontado o tempo acima mencionado, que já não seria mais gasto, há ainda que se preocupar com o tempo necessário para a execução de cada tarefa. Ficou muito claro que o tempo gasto para obter as coordenadas fotogramétricas foi alto. O processo de medida foi manual e, embora auxiliado por um programa de fácil uso e que organiza os dados no formato correto para o programa de fototriangulação, quando se pensa em produção, alguma coisa a mais teria que ser realizada – a automação das leituras. A Empresa GeoKosmos desenvolveu um programa para ler automaticamente coordenadas de marcas fiduciais. Com o mesmo algoritmo seria possível obter automaticamente as coordenadas de alvos bem projetados para facilitar o processo de automação. Alvos do tipo circular, por sua simetria são os mais promissores. Os alvos com códigos do tipo “códigos de barra” poderiam ser muito úteis para a identificação dos mesmos.

Este tema está eleito como prioritário para a continuação desta pesquisa, pois tornará muito rápida a execução da tarefa mais demorada. Será possível, numa primeira etapa, em um par de horas processar os dados de 8 horas de ensaios. Numa etapa posterior poder-se-á trabalhar para viabilizar o processamento em tempo real, fazendo-se transferir também em tempo real as imagens para um computador. Os programas envolvidos têm velocidade suficiente para tal desafio.

Até ações mais sofisticadas poderão ser estudadas, como por exemplo,

disparar a câmera automaticamente com a frequência desejada.

A riqueza dos dados gerados neste trabalho poderá subsidiar estudos interessantes na área de Laboratório de Tecnologia da Madeira, como por exemplo, a análise no Módulo de Young ao longo das diferentes seções transversais de um corpo de prova. Poderia ser estudado um índice de uniformidade das propriedades elásticas de produtos de madeira, um procedimento de calibração da velocidade da prensa e outras aplicações.

## 9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, J. BITTENCOURT (1977) **Photogrammetric Refraction**. Tese de Doutorado. The Ohio State University. Columbus, Ohio, USA.

ANDRADE, J. BITTENCOURT(1998). **FOTOGRAMETRIA**. Editora SBEE. Curitiba, PR.

ANDRADE, J. BITTENCOURT(2003). **FOTOGRAMETRIA**. Segunda Edição. Editora SBEE. Curitiba, PR.

ANDRADE, REGINA DO ROCIO DE (2001). **Mensurações Dentrométricas com Câmeras Digitais Calibradas**. Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal. Setor de Ciências Agrárias da UFPR. Curitiba, PR.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9533/1986: COMPENSADO – DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À FLEXÃO ESTÁTICA**.

BÄHR, H.P (1991). **Procesamiento Digital de Imágenes. Aplicaciones en Fotogrametría y Teledetección**. Editor: Prof. Dr. Hans Peter Bähr, com diversos autores. Universidade de Karlsruhe. Copyright da versão alemã: Herbert Wichmann Verlag 1985. Traduzido do alemão por Prof. Anita E. Schwender da Universidade Tecnológica Nacional de Santa Fé. República Argentina.

BROWN, D. C. (1964) An Advanced Plate Reduction for Photogrammetric Cameras. **Report, Air Force Cambridge Research Laboratories**. USA.

BROWN, D. G. (1965) Decentering Distortion and the Definitive Calibration of Metric Cameras. **The American Society of Photogrammetry Convention**, March. USA.

BROWN, D. C. (1966) Decentering Distortion of Lenses. **Photogrammetric Engineering**, May, 1966. USA.

BROWN, D. C. (1969) Advanced Methods for the Calibration of Metric Cameras. In: **Symposium on Computational Photogrammetry**. Syracuse University, 1969. USA.

BROWN, D. C. (1971) Analytical Calibration of Close Range Cameras. In: **Close Range Photogrammetry Symposium**. Urbana, Illinois, USA.

CONRADY, A. E. (1919) Decentered lens system. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**.

EISENHART, CHURCHILL (1963). Realistic evaluation of the Precision and Accuracy of Instrument Calibration Systems. **Journal of Research of the National Bureau of Standards**. C. Engineering and Instrumentation. 67C(2):161-87. Apr./Jun. 1963. USA.

KENEFICK, JOHN F., M. S. GYER and B. F. HARP (1972) Analytical Self-Calibration; **Photogrammetric Engineering**, Nov, 1972. USA.

LACERDA, FLÁVIO SUPLICY DE (1955) **Resistência dos Materiais**. Editora Globo. Rio de Janeiro, Porto Alegre, São Paulo.

MERCHANT, D. C. (1973). **Elements of Photogrammetry**, Parts I and II. Geodetic Science Department, The Ohio State University, Columbus, Ohio, USA.

MERCHANT, D. C. (1968) **Calibration of the Aerial Photogrammetric System**. Rome Air Development Center, USA.

MERCHANT, D. C. (1971) **An investigation Into Dynamic Aerial Photographic System Calibration**. RADCR-71-174, Final Report. Columbus, Ohio, USA.

MERCHANT, D. C. (1979) **Analytical Photogrammetry – Theory and Practice**. The Ohio State University. Columbus, Ohio, USA.

MULLER, IVAN I.; KUMAR, M.; SOLER, TOMAS (1973). Free Geometric Adjustment of the Secor Equatorial Network (Solution SECOR-27). **Reports of of Geodetic Science. Report #195**. Columbus, Ohio, USA.

NIKON – **The Nikon Guide to Digital Photography with the COOLPIX5700 Digital Camera**. Nikon Corporation. Fuji Bldg, 2-3 Marunouchi 3 – chome. Chiyoda-ku, Tokyo 100-8331, Japan.

WANDRESEN, ROMUALDO (2004). **Integração entre Redes Neurais e Correlação para Identificar Pontos de Apoio Pré-sinalizados**. Tese de Doutorado. UFPR, Curitiba.

WEHRLI, GREGORY R. (2001) **Photogrammetric Scanners – The Technology Behind Them & Where They Are Going**. Wehrli & Associates. New York, USA.

## ANEXO – OBSERVAÇÕES E RESULTADOS FOTOGRAMÉTRICOS

O anexo contém um exemplo de cada tipo de dados de entrada e saídas de computador, bem como um gráfico resumo de cada uma das 12 experiências.

A tabela 1 mostra as coordenadas aproximadas dos alvos para calibração da câmera e para a fototriangulação para materializar o referencial do espaço objeto para os ensaios.

A tabela 2 contém as coordenadas fotogramétricas correspondentes.

A tabela 3 contém a orientação externa das 7 imagens para a calibração do sistema de mensuração.

A tabela 4 traz as distâncias entre alguns alvos que foram utilizadas como injunções no processo de calibração do sistema de mensuração.

A tabela 5 mostra o relatório da fototriangulação simultânea dos dados de calibração da câmera e da determinação do referencial do sistema de mensuração.

TABELA 1 – COORDENADAS APROXIMADAS DOS ALVOS DO SISTEMA DE MENSURAÇÃO

Ponto	continua								
	X	Y	Z	DPX	DPY	DPZ	FX	FY	FZ
A1	-30	20	-65	1	1	1	0	0	0
A2	-20	20	-65	1	1	1	0	0	0
A3	-10	20	-65	1	1	1	0	0	0
A4	0	20	-65	1	1	1	0	0	0
A5	10	20	-65	1	1	1	0	0	0
A6	20	20	-65	1	1	1	0	0	0
A7	30	20	-65	1	1	1	0	0	0
B1	-30	10	-65	1	1	1	0	0	0
B2	-20	10	-65	1	1	1	0	0	0
B3	-10	10	-65	1	1	1	0	0	0
B4	0	10	-65	1	1	1	0	0	0
B5	10	10	-65	1	1	1	0	0	0
B6	20	10	-65	1	1	1	0	0	0
B7	30	10	-65	1	1	1	0	0	0
C1	-30	0	-65	1	1	1	0	0	0
C2	-20	0	-65	1	1	1	0	0	0
C3	-10	0	-65	1	1	1	0	0	0
C4	0	0	-65	1	1	1	0	0	0

TABELA 1 – COORDENADAS APROXIMADAS DOS ALVOS DO SISTEMA DE MENSURAÇÃO

Ponto	Conclusão								
	X	Y	Z	DPX	DPY	DPZ	FX	FY	FZ
C5	10	0	-65	1	1	1	0	0	0
C6	20	0	-65	1	1	1	0	0	0
C7	30	0	-65	1	1	1	0	0	0
D1	-30	-10	-65	1	1	1	0	0	0
D2	-20	-10	-65	1	1	1	0	0	0
D3	-10	-10	-65	1	1	1	0	0	0
D4	0	-10	-65	1	1	1	0	0	0
D5	10	-10	-65	1	1	1	0	0	0
D6	20	-10	-65	1	1	1	0	0	0
D7	30	-10	-65	1	1	1	0	0	0
E1	-30	-20	-65	1	1	1	0	0	0
E2	-20	-20	-65	1	1	1	0	0	0
E3	-10	-20	-65	1	1	1	0	0	0
E4	0	-20	-65	1	1	1	0	0	0
E5	10	-20	-65	1	1	1	0	0	0
E6	20	-20	-65	1	1	1	0	0	0
E7	30	-20	-65	1	1	1	0	0	0
M7.1	14.059	20.217	-60	1	1	1	0	0	0
M7.2	17.407	20.308	-60	1	1	1	0	0	0
M7.3	20.919	20.299	-60	1	1	1	0	0	0
M7.4	24.414	20.345	-60	1	1	1	0	0	0
M7.5	27.99	20.399	-60	1	1	1	0	0	0
M7.6	31.466	20.363	-60	1	1	1	0	0	0
M7.7	35.015	20.345	-60	1	1	1	0	0	0
F18e	10.337	13.84	-60	1	1	1	0	0	0
F16e	12.262	13.84	-60	1	1	1	0	0	0
F14e	14.196	13.849	-60	1	1	1	0	0	0
F12e	16.166	13.84	-60	1	1	1	0	0	0
F10e	18.164	13.84	-60	1	1	1	0	0	0
F8e	20.19	13.812	-60	1	1	1	0	0	0
F6e	22.206	13.849	-60	1	1	1	0	0	0
F4e	24.249	13.858	-60	1	1	1	0	0	0
F2e	26.293	13.876	-60	1	1	1	0	0	0
F0	28.346	13.867	-60	1	1	1	0	0	0
F2d	30.498	13.858	-60	1	1	1	0	0	0
F4d	32.424	13.849	-60	1	1	1	0	0	0
F6d	34.449	13.858	-60	1	1	1	0	0	0
F8d	36.474	13.867	-60	1	1	1	0	0	0
F16d	44.384	13.895	-60	1	1	1	0	0	0
F18d	46.337	13.913	-60	1	1	1	0	0	0
Fmorsa	8.065	24.833	-60	1	1	1	0	0	0
FPrensa1	30.143	28.337	-60	1	1	1	0	0	0
FParafuso	45.287	15.655	-60	1	1	1	0	0	0
FPrensa2	25.271	27.953	-60	1	1	1	0	0	0
FParafuso2	12.736	16.112	-60	1	1	1	0	0	0



TABELA 2 – COORDENADAS FOTOGRAMÉTRICAS PARA CALIBRAÇÃO DO SISTEMA DE MENSURAÇÃO

FAIXA	PHOTO	PONTO	continua	
			x	y
CAL	1077	1	0	0
CAL	1077	2	2560	0
CAL	1077	3	0	1920
CAL	1077	4	2560	1920
CAL	1077	A1	194	1847
CAL	1077	A2	503	1819
CAL	1077	A3	876	1819
CAL	1077	A4	1260	1828
CAL	1077	A5	1687	1805
CAL	1077	A6	2045	1783
CAL	1077	A7	2442	1777
CAL	1077	B1	183	1478
CAL	1077	B2	482	1488
CAL	1077	B3	830	1483
CAL	1077	B4	1230	1476
CAL	1077	B5	1648	1461
CAL	1077	B6	2017	1433
CAL	1077	B7	2384	1432
CAL	1077	C1	169	1103
CAL	1077	C2	461	1109
CAL	1077	C3	844	1097
CAL	1077	C4	1266	1087
CAL	1077	C5	1658	1084
CAL	1077	C6	2045	1070
CAL	1077	C7	2420	1065
CAL	1077	D1	179	705
CAL	1077	D2	440	694
CAL	1077	D3	786	669
CAL	1077	D4	1222	667
CAL	1077	D5	1606	666
CAL	1077	D6	2007	662
CAL	1077	D7	2365	666
CAL	1077	E1	175	336
CAL	1077	E2	433	316
CAL	1077	E3	777	313
CAL	1077	E4	1199	310
CAL	1077	E5	1571	310
CAL	1077	E6	1961	318
CAL	1077	E7	2327	335

TABELA 2 – COORDENADAS FOTOGRAFÉTRICAS PARA CALIBRAÇÃO DO SISTEMA DE MENSURAÇÃO

continuação				
FAIXA	PHOTO	PONTO	x	y
CAL	1078	1	0	0
CAL	1078	2	2560	0
CAL	1078	3	0	1920
CAL	1078	4	2560	1920
CAL	1078	A1	2006	1676
CAL	1078	A2	1985	1373
CAL	1078	A3	1986	1007
CAL	1078	A4	1997	634
CAL	1078	A5	1978	225
CAL	1078	B1	1653	1690
CAL	1078	B2	1665	1393
CAL	1078	B3	1663	1046
CAL	1078	B4	1658	653
CAL	1078	B5	1648	251
CAL	1078	C1	1284	1709
CAL	1078	C2	1292	1413
CAL	1078	C3	1283	1028
CAL	1078	C4	1278	611
CAL	1078	C5	1281	231
CAL	1078	D1	882	1703
CAL	1078	D2	877	1436
CAL	1078	D3	857	1084
CAL	1078	D4	862	648
CAL	1078	D5	869	270
CAL	1078	E1	506	1713
CAL	1078	E2	490	1447
CAL	1078	E3	494	1096
CAL	1078	E4	501	669
CAL	1078	E5	510	299

TABELA 2 – COORDENADAS FOTOGRAMÉTRICAS PARA CALIBRAÇÃO DO SISTEMA DE MENSURAÇÃO

continuação				
FAIXA	PHOTO	PONTO	x	y
CAL	1079	1	0	0
CAL	1079	2	2560	0
CAL	1079	3	0	1920
CAL	1079	4	2560	1920
CAL	1079	A1	419	1822
CAL	1079	A2	771	1743
CAL	1079	A3	1148	1691
CAL	1079	A4	1486	1655
CAL	1079	A5	1814	1591
CAL	1079	A6	2059	1542
CAL	1079	A7	2301	1509
CAL	1079	B1	401	1400
CAL	1079	B2	748	1386
CAL	1079	B3	1108	1353
CAL	1079	B4	1467	1319
CAL	1079	B5	1790	1284
CAL	1079	B6	2045	1246
CAL	1079	B7	2273	1235
CAL	1079	C1	378	962
CAL	1079	C2	724	967
CAL	1079	C3	1123	953
CAL	1079	C4	1499	944
CAL	1079	C5	1801	944
CAL	1079	C6	2067	936
CAL	1079	C7	2299	936
CAL	1079	D1	385	490
CAL	1079	D2	699	500
CAL	1079	D3	1065	503
CAL	1079	D4	1463	537
CAL	1079	D5	1765	563
CAL	1079	D6	2045	585
CAL	1079	D7	2271	607
CAL	1079	E1	375	49
CAL	1079	E2	686	73
CAL	1079	E3	1052	126
CAL	1079	E4	1441	185
CAL	1079	E5	1740	232
CAL	1079	E6	2016	282
CAL	1079	E7	2251	330

TABELA 2 – COORDENADAS FOTOGRAMÉTRICAS PARA CALIBRAÇÃO DO SISTEMA DE MENSURAÇÃO

continuação				
FAIXA	PHOTO	PONTO	x	y
CAL	1080	1	0	0
CAL	1080	2	2560	0
CAL	1080	3	0	1920
CAL	1080	4	2560	1920
CAL	1080	A1	435	1524
CAL	1080	A2	638	1517
CAL	1080	A3	903	1534
CAL	1080	A4	1196	1563
CAL	1080	A5	1551	1570
CAL	1080	A6	1877	1576
CAL	1080	A7	2271	1600
CAL	1080	B1	421	1243
CAL	1080	B2	620	1255
CAL	1080	B3	867	1259
CAL	1080	B4	1170	1263
CAL	1080	B5	1516	1263
CAL	1080	B6	1850	1251
CAL	1080	B7	2215	1265
CAL	1080	C1	406	955
CAL	1080	C2	601	956
CAL	1080	C3	874	944
CAL	1080	C4	1196	933
CAL	1080	C5	1523	928
CAL	1080	C6	1878	914
CAL	1080	C7	2256	908
CAL	1080	D1	406	647
CAL	1080	D2	582	628
CAL	1080	D3	827	595
CAL	1080	D4	1159	575
CAL	1080	D5	1478	556
CAL	1080	D6	1844	533
CAL	1080	D7	2203	518
CAL	1080	E1	397	357
CAL	1080	E2	572	326
CAL	1080	E3	812	301
CAL	1080	E4	1140	268
CAL	1080	E5	1449	239
CAL	1080	E6	1802	212
CAL	1080	E7	2168	194

TABELA 2 – COORDENADAS FOTOGRAMÉTRICAS PARA CALIBRAÇÃO DO SISTEMA DE MENSURAÇÃO

continuação				
FAIXA	PHOTO	PONTO	x	y
E01	DSCN0001	1	0	0
E01	DSCN0001	2	2560	0
E01	DSCN0001	3	0	1920
E01	DSCN0001	4	2560	1920
E01	DSCN0001	M7.1	443	1112
E01	DSCN0001	M7.2	639	1118
E01	DSCN0001	M7.3	837	1118
E01	DSCN0001	M7.4	1025	1122
E01	DSCN0001	M7.5	1211	1126
E01	DSCN0001	M7.6	1384	1124
E01	DSCN0001	M7.7	1554	1125
E01	DSCN0001	F18e	242	777
E01	DSCN0001	F16e	361	782
E01	DSCN0001	F14e	479	786
E01	DSCN0001	F12e	595	793
E01	DSCN0001	F10e	710	797
E01	DSCN0001	F8e	822	803
E01	DSCN0001	F6e	932	808
E01	DSCN0001	F4e	1040	809
E01	DSCN0001	F2e	1146	818
E01	DSCN0001	F0	1251	822
E01	DSCN0001	F2d	1353	826
E01	DSCN0001	F4d	1450	830
E01	DSCN0001	F6d	1546	834
E01	DSCN0001	F8d	1640	839
E01	DSCN0001	F18d	2067	856

TABELA 2 – COORDENADAS FOTOGRAMÉTRICAS PARA CALIBRAÇÃO DO SISTEMA DE MENSURAÇÃO

continuação				
FAIXA	PHOTO	PONTO	x	y
E01	DSCN0002	1	0	0
E01	DSCN0002	2	2560	0
E01	DSCN0002	3	0	1920
E01	DSCN0002	4	2560	1920
E01	DSCN0002	M7.1	682	1111
E01	DSCN0002	M7.2	835	1116
E01	DSCN0002	M7.3	1001	1115
E01	DSCN0002	M7.4	1171	1118
E01	DSCN0002	M7.5	1352	1121
E01	DSCN0002	M7.6	1534	1119
E01	DSCN0002	M7.7	1726	1119
E01	DSCN0002	F18e	496	833
E01	DSCN0002	F16e	580	831
E01	DSCN0002	F14e	667	830
E01	DSCN0002	F12e	757	827
E01	DSCN0002	F10e	850	825
E01	DSCN0002	F8e	944	823
E01	DSCN0002	F6e	1042	822
E01	DSCN0002	F4e	1142	817
E01	DSCN0002	F2e	1244	818
E01	DSCN0002	F0	1349	815
E01	DSCN0002	F2d	1454	812
E01	DSCN0002	F4d	1563	809
E01	DSCN0002	F6d	1672	807
E01	DSCN0002	F16d	2244	793
E01	DSCN0002	F18d	2362	791

TABELA 2 – COORDENADAS FOTOGRAMÉTRICAS PARA CALIBRAÇÃO DO SISTEMA DE MENSURAÇÃO

FAIXA	PHOTO	PONTO	conclusão	
			x	y
E01	DSCN0003	1	0	0
E01	DSCN0003	2	2560	0
E01	DSCN0003	3	0	1920
E01	DSCN0003	4	2560	1920
E01	DSCN0003	M7.1	770	1108
E01	DSCN0003	M7.2	954	1113
E01	DSCN0003	M7.3	1146	1112
E01	DSCN0003	M7.4	1337	1115
E01	DSCN0003	M7.5	1533	1119
E01	DSCN0003	M7.6	1725	1116
E01	DSCN0003	M7.7	1919	1115
E01	DSCN0003	F18e	565	797
E01	DSCN0003	F16e	670	796
E01	DSCN0003	F14e	777	796
E01	DSCN0003	F12e	885	798
E01	DSCN0003	F10e	995	797
E01	DSCN0003	F8e	1105	798
E01	DSCN0003	F6e	1217	798
E01	DSCN0003	F4e	1328	796
E01	DSCN0003	F2e	1440	800
E01	DSCN0003	F0	1554	801
E01	DSCN0003	F2d	1665	800
E01	DSCN0003	F4d	1777	801
E01	DSCN0003	F6d	1888	800
E01	DSCN0003	F8d	1998	801
E01	DSCN0003	F16d	2434	803
E01	DSCN0003	F18d	2540	803

TABELA 3 ENTRADA DE ORIENTAÇÃO EXTERNA PARA CALIBRAÇÃO DO SISTEMA DE MENSURAÇÃO

Orientação Externa (Unidades: linear – cm e angular – grau sexagesimal)													
PHOTO	X0	Y0	Z0	$\omega$	$\phi$	$\kappa$	Standard Deviation Exterior Orientation						Flags
CAL_1077	0	0	0	0	0	0	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	1 1 1 1 1 1
CAL_1078	0	0	0	0	0	90	0	0	0	0	0	0	0 0 0 0 0 0
CAL_1079	-35	0	0	0	-27.5	0	0	0	0	0	0	0	0 0 0 0 0 0
CAL_1080	35	0	0	0	18	0	0	0	0	0	0	0	0 0 0 0 0 0
E01_DSCN0001	-12	18	0	0	-20	0	0	0	0	0	0	0	0 0 0 0 0 0
E01_DSCN0002	37	18	0	0	12	0	0	0	0	0	0	0	0 0 0 0 0 0
E01_DSCN0003	23.355	17.516	0	0	0	0	0.01	0.01	0.01	0.001	0.001	0.001	1 1 1 1 1 1

TABELA 4 – DISTÂNCIAS PARA A CALIBRAÇÃO DO SISTEMA DE MENSURAÇÃO

Ponto 1	Ponto 2	Distância (cm)	DP (cm)
A1	E7	67.8	0.03
E1	A7	70.0	0.03
C2	C6	40.3	0.03
D3	B6	36.7	0.03
F18e	F18d	45.7	0.03
F16e	F6d	27.9	0.03
F0	F14e	17.8	0.03
F18e	F16d	43.2	0.03
F16e	F8d	30.5	0.03
F16e	F10d	30.0	0.03
F14e	F18d	40.6	0.03

A seguir o relatório de saída do programa GeoBundle<sup>®</sup> mostrando os resultados do processamento simultâneo dos dados de calibração (fotos 1077 a 1080).

#### RELATÓRIO DA CALIBRAÇÃO SIMULTÂNEA DA CÂMERA E DO SISTEMA DE MENSURAÇÃO

Calibration Report - E:\REGINA\Experimentos030304\AJUSTAMENTO  
FOTOGRAFETRICO\SuperEspecial\Calib\_Calib\_Esp\_calib.txt  
Calibration Report - \_calib.txt

Calibration Date: Oct 11, 2004 12:40:26

No. of photos: 7

No. of points: 58

Total of images: 197

No. of distances: 10

A priori Variance: 1.00000

A posteriori Variance: 0.61765

Chi Squared: 123.530575

Degrees of Freedom: 200

Refraction: 0.0000000e+000 SDev: 0.0000000e+000

Gaussian values:

Focal Distance: 2593.8721 mm

K1: -1.7945911e-008

K2: -7.0863290e-015

K3: 3.1668706e-021



Calibrated values:

Focal Distance: 2592.9694 mm      SDev: 1.1289 pixel  
 X0: 1280.0069 mm      SDev: 1.1297 pixel  
 Y0: 960.0320 mm      SDev: 1.1296 pixel  
 K0: 3.4800471e-004  
 K1: -1.7939665e-008      SDev: 1.2027075e-009  
 K2: -7.0838629e-015      SDev: 7.2488215e-016  
 K3: 3.1657686e-021      SDev: 2.5530454e-022  
 P1: -9.0384395e-008      SDev: 7.5849263e-008  
 P2: -3.1209489e-007      SDev: 7.5792035e-008

Variance-covariance Matrix for Photo#1

Omega 1.881e-008  
 Phi 2.523e-024 1.881e-008  
 Kappa 4.346e-024 -8.078e-025 1.881e-008  
 X -2.160e-022 1.350e-022 -4.905e-022 6.177e-005  
 Y 4.875e-023 4.275e-022 6.049e-022 -1.087e-020 6.177e-005  
 Z -2.503e-022 -3.127e-022 -2.090e-022 2.556e-020 3.792e-020 6.177e-005

Variance-covariance Matrix for Photo#2

Omega 2.620e-006  
 Phi 4.171e-007 3.229e-006  
 Kappa -7.860e-008 -9.755e-008 9.712e-008  
 X 2.874e-005 2.196e-004 -6.691e-006 1.514e-002  
 Y -1.753e-004 -2.448e-005 4.990e-006 -1.686e-003 1.194e-002  
 Z -6.449e-006 5.308e-006 -9.803e-008 3.640e-004 4.443e-004 5.248e-004

Variance-covariance Matrix for Photo#3

Omega 1.689e-006  
 Phi 9.022e-008 7.851e-007  
 Kappa 9.833e-008 -3.905e-010 9.386e-008  
 X 1.408e-005 5.583e-005 1.594e-008 4.780e-003  
 Y -1.018e-004 -6.085e-006 -6.285e-006 -8.502e-004 6.314e-003  
 Z 6.065e-006 3.107e-005 -3.506e-007 2.318e-003 -3.809e-004 1.712e-003

Variance-covariance Matrix for Photo#4

Omega 1.649e-006  
 Phi 7.470e-008 8.169e-007  
 Kappa -9.796e-008 -7.066e-009 8.771e-008  
 X 2.108e-007 5.887e-005 -5.695e-007 4.777e-003  
 Y -1.201e-004 -3.961e-006 7.282e-006 4.611e-005 8.928e-003  
 Z -6.958e-007 -2.577e-005 5.810e-007 -1.898e-003 1.216e-005 1.391e-003

Variance-covariance Matrix for Photo#5

Omega 5.525e-005  
 Phi -1.537e-005 1.561e-005  
 Kappa 3.521e-006 -1.299e-006 4.732e-007  
 X -8.544e-004 8.948e-004 -7.309e-005 5.171e-002  
 Y -3.261e-003 9.115e-004 -2.066e-004 5.065e-002 1.926e-001  
 Z -6.213e-004 4.903e-004 -5.064e-005 2.752e-002 3.686e-002 1.936e-002

## Variance-covariance Matrix for Photo#6

Omega 3.449e-005

Phi -1.259e-006 1.753e-005

Kappa 1.250e-006 -4.868e-007 2.676e-007

X -1.099e-004 1.152e-003 -3.260e-005 7.598e-002

Y -2.104e-003 7.258e-005 -7.577e-005 6.451e-003 1.284e-001

Z -2.572e-005 -2.784e-004 8.959e-006 -1.779e-002 1.734e-003 7.274e-003

## Variance-covariance Matrix for Photo#7

Omega 1.881e-010

Phi 6.553e-029 1.881e-010

Kappa -1.720e-027 -8.573e-029 1.881e-010

X -2.241e-025 -2.684e-023 3.508e-025 6.177e-005

Y -6.157e-024 -4.074e-025 -6.897e-024 3.242e-022 6.177e-005

Z -3.632e-025 6.382e-024 1.073e-026 5.108e-021 -1.199e-021 6.177e-005

## Variance-covariance Matrix for Point#1

X 4.290e-004

Y -1.183e-004 4.541e-004

Z 4.311e-004 -4.931e-004 8.210e-003

## Variance-covariance Matrix for Point#2

X 3.952e-004

Y -1.288e-004 4.989e-004

Z 5.945e-004 -8.063e-004 7.342e-003

## Variance-covariance Matrix for Point#3

X 3.225e-004

Y -6.507e-005 5.147e-004

Z 3.527e-004 -9.865e-004 6.549e-003

## Variance-covariance Matrix for Point#4

X 3.026e-004

Y 2.690e-005 5.275e-004

Z -6.200e-005 -1.017e-003 6.189e-003

## Variance-covariance Matrix for Point#5

X 3.715e-004

Y 1.229e-004 5.101e-004

Z -4.585e-004 -9.067e-004 6.323e-003

## Variance-covariance Matrix for Point#6

X 5.017e-004

Y 1.685e-004 5.229e-004

Z -6.025e-004 -6.937e-004 6.721e-003

## Variance-covariance Matrix for Point#7

X 5.361e-004

Y 1.298e-004 4.650e-004

Z -2.572e-004 -3.323e-004 7.449e-003

## Variance-covariance Matrix for Point#8

X 4.913e-004

Y -1.170e-004 3.715e-004

Z 8.084e-004 -5.090e-004 7.592e-003

## Variance-covariance Matrix for Point#9

X	4.186e-004		
Y	-1.033e-004	3.741e-004	
Z	8.206e-004	-6.620e-004	6.757e-003

## Variance-covariance Matrix for Point#10

X	3.299e-004		
Y	-6.143e-005	3.784e-004	
Z	4.743e-004	-7.241e-004	5.768e-003

## Variance-covariance Matrix for Point#11

X	2.892e-004		
Y	1.466e-005	3.766e-004	
Z	-7.625e-005	-7.009e-004	5.153e-003

## Variance-covariance Matrix for Point#12

X	3.656e-004		
Y	8.268e-005	3.669e-004	
Z	-5.668e-004	-6.217e-004	5.256e-003

## Variance-covariance Matrix for Point#13

X	3.863e-004		
Y	3.471e-005	3.470e-004	
Z	-4.214e-004	-2.676e-004	4.903e-003

## Variance-covariance Matrix for Point#14

X	6.499e-004		
Y	1.358e-004	4.055e-004	
Z	-6.491e-004	-3.381e-004	6.380e-003

## Variance-covariance Matrix for Point#15

X	5.084e-004		
Y	-4.090e-005	2.972e-004	
Z	9.295e-004	-1.796e-004	7.202e-003

## Variance-covariance Matrix for Point#16

X	3.713e-004		
Y	-2.501e-005	2.836e-004	
Z	7.069e-004	-1.585e-004	5.884e-003

## Variance-covariance Matrix for Point#17

X	3.298e-004		
Y	-1.395e-005	2.742e-004	
Z	4.756e-004	-1.500e-004	5.151e-003

## Variance-covariance Matrix for Point#18

X	2.877e-004		
Y	5.721e-006	2.718e-004	
Z	-1.479e-004	-1.262e-004	4.531e-003

## Variance-covariance Matrix for Point#19

X	3.759e-004		
Y	2.125e-005	2.778e-004	
Z	-6.198e-004	-1.246e-004	4.669e-003

## Variance-covariance Matrix for Point#20

X	3.797e-004		
Y	1.567e-005	3.231e-004	
Z	-4.320e-004	-7.532e-005	4.400e-003

## Variance-covariance Matrix for Point#21

X	6.650e-004		
Y	3.261e-005	3.449e-004	
Z	-6.689e-004	-9.471e-005	5.857e-003

## Variance-covariance Matrix for Point#22

X	4.931e-004		
Y	4.739e-005	3.078e-004	
Z	7.492e-004	1.659e-004	6.695e-003

## Variance-covariance Matrix for Point#23

X	4.273e-004		
Y	4.863e-005	3.009e-004	
Z	7.850e-004	3.137e-004	5.977e-003

## Variance-covariance Matrix for Point#24

X	3.062e-004		
Y	1.903e-005	2.946e-004	
Z	3.585e-004	3.530e-004	4.791e-003

## Variance-covariance Matrix for Point#25

X	2.895e-004		
Y	-7.021e-006	3.138e-004	
Z	-7.306e-005	4.485e-004	4.475e-003

## Variance-covariance Matrix for Point#26

X	3.556e-004		
Y	-4.527e-005	3.089e-004	
Z	-4.991e-004	3.869e-004	4.541e-003

## Variance-covariance Matrix for Point#27

X	4.901e-004		
Y	-5.930e-005	3.482e-004	
Z	-7.045e-004	2.931e-004	4.995e-003

## Variance-covariance Matrix for Point#28

X	6.516e-004		
Y	-8.260e-005	3.680e-004	
Z	-5.883e-004	1.402e-004	5.513e-003

## Variance-covariance Matrix for Point#29

X	4.487e-004		
Y	8.943e-005	3.861e-004	
Z	3.991e-004	1.922e-004	6.634e-003

## Variance-covariance Matrix for Point#30

X	4.104e-004		
Y	9.459e-005	4.015e-004	
Z	4.849e-004	3.978e-004	5.851e-003

## Variance-covariance Matrix for Point#31

X	3.358e-004		
Y	5.470e-005	3.960e-004	
Z	3.616e-004	5.938e-004	5.212e-003

## Variance-covariance Matrix for Point#32

X	3.026e-004		
Y	-1.098e-005	4.055e-004	
Z	-1.766e-005	6.665e-004	4.800e-003

## Variance-covariance Matrix for Point#33

X	3.497e-004		
Y	-7.195e-005	4.004e-004	
Z	-3.352e-004	5.954e-004	4.836e-003

## Variance-covariance Matrix for Point#34

X	4.768e-004		
Y	-1.141e-004	4.422e-004	
Z	-4.919e-004	4.409e-004	5.111e-003

## Variance-covariance Matrix for Point#35

X	5.172e-004		
Y	-9.073e-005	4.137e-004	
Z	-2.476e-004	1.229e-004	5.413e-003

## Variance-covariance Matrix for Point#36

X	4.584e-004		
Y	-7.232e-005	2.407e-004	
Z	1.368e-003	-3.498e-004	8.734e-003

## Variance-covariance Matrix for Point#37

X	2.851e-004		
Y	-3.288e-005	2.246e-004	
Z	6.918e-004	-2.450e-004	6.842e-003

## Variance-covariance Matrix for Point#38

X	2.221e-004		
Y	-1.524e-005	2.188e-004	
Z	3.105e-004	-2.637e-004	7.227e-003

## Variance-covariance Matrix for Point#39

X	2.165e-004		
Y	7.147e-006	2.202e-004	
Z	-2.069e-004	-3.383e-004	8.516e-003

## Variance-covariance Matrix for Point#40

X	3.098e-004		
Y	4.068e-005	2.233e-004	
Z	-9.404e-004	-4.048e-004	9.821e-003

## Variance-covariance Matrix for Point#41

X	5.032e-004		
Y	7.029e-005	2.252e-004	
Z	-1.679e-003	-4.090e-004	1.059e-002

## Variance-covariance Matrix for Point#42

X	7.457e-004		
Y	8.873e-005	2.281e-004	
Z	-2.262e-003	-3.767e-004	1.092e-002

## Variance-covariance Matrix for Point#43

X	8.320e-004		
Y	1.600e-004	2.569e-004	
Z	2.527e-003	6.852e-004	1.163e-002

## Variance-covariance Matrix for Point#44

X	4.826e-004		
Y	9.129e-005	2.385e-004	
Z	1.450e-003	4.922e-004	8.406e-003

## Variance-covariance Matrix for Point#45

X	3.246e-004		
Y	5.590e-005	2.275e-004	
Z	9.537e-004	4.039e-004	7.014e-003

## Variance-covariance Matrix for Point#46

X	3.139e-004		
Y	5.211e-005	2.241e-004	
Z	8.938e-004	4.212e-004	7.178e-003

## Variance-covariance Matrix for Point#47

X	2.660e-004		
Y	4.176e-005	2.228e-004	
Z	7.078e-004	4.490e-004	7.435e-003

## Variance-covariance Matrix for Point#48

X	2.327e-004		
Y	3.188e-005	2.251e-004	
Z	5.310e-004	5.157e-004	8.345e-003

## Variance-covariance Matrix for Point#49

X	2.078e-004		
Y	1.547e-005	2.271e-004	
Z	2.619e-004	5.863e-004	9.522e-003

## Variance-covariance Matrix for Point#50

X	2.042e-004		
Y	-7.819e-006	2.315e-004	
Z	-1.206e-004	6.713e-004	1.084e-002

## Variance-covariance Matrix for Point#51

X	2.370e-004		
Y	-3.768e-005	2.341e-004	
Z	-6.248e-004	7.317e-004	1.212e-002

## Variance-covariance Matrix for Point#52

X	2.928e-004		
Y	-6.826e-005	2.378e-004	
Z	-1.150e-003	7.866e-004	1.316e-002

## Variance-covariance Matrix for Point#53

X 4.594e-004  
 Y -1.121e-004 2.437e-004  
 Z -1.890e-003 8.517e-004 1.431e-002

## Variance-covariance Matrix for Point#54

X 6.317e-004  
 Y -1.405e-004 2.417e-004  
 Z -2.472e-003 8.293e-004 1.466e-002

## Variance-covariance Matrix for Point#55

X 7.503e-004  
 Y -1.534e-004 2.410e-004  
 Z -2.784e-003 7.810e-004 1.435e-002

## Variance-covariance Matrix for Point#56

X 1.294e-003  
 Y -2.308e-004 3.073e-004  
 Z -3.962e-003 8.818e-004 1.600e-002

## Variance-covariance Matrix for Point#57

X 1.080e-003  
 Y -1.028e-004 2.514e-004  
 Z -2.624e-003 3.524e-004 1.203e-002

## Variance-covariance Matrix for Point#58

X 1.498e-003  
 Y -1.779e-004 2.907e-004  
 Z -3.849e-003 5.960e-004 1.523e-002

## Variance-covariance Matrix for Calibration

F 6.176e-003  
 X0 1.162e-007 6.176e-003  
 Y0 9.024e-009 2.215e-008 6.176e-003  
 K1 -1.173e-013 3.897e-014 -5.563e-014 1.447e-018  
 K2 4.017e-020 -1.870e-020 -5.829e-021 -5.466e-025 5.255e-031  
 K3 1.343e-027 -4.996e-028 3.530e-026 4.910e-032 -1.482e-037 6.518e-044  
 P1 -4.583e-012 2.487e-012 -1.942e-012 4.139e-018 4.674e-025 -2.594e-031 5.753e-015  
 P2 3.079e-012 6.935e-013 3.576e-013 2.529e-018 -2.527e-025 -9.676e-032 -4.926e-018 5.744e-015

Cada imagem simples tomada para determinar a posição especial no tempo de cada alvo no corpo de prova foi processada para a determinação simultânea de sua orientação interna e das coordenadas dos alvos, com os elementos de orientação externa injuncionados de modo a permitir o movimento relativo da câmera. A seguir é mostrado o relatório de ajustamento. Trata-se de um processo de ressecção e orientação com determinação simultânea de coordenadas X e Y dos alvos colocados no corpo de prova.

## RELATÓRIO DA DETERMINAÇÃO DE COORDENADAS DA FOTO D122 DA EXP. E10

File name: E10FOTO122.GBD

File saved October 23, 2004 14:14:44

Number of Cameras = 1

Number of Strips: 1

Number of Photos = 1, 1 Weighted

Number of Points = 12, 12 Weighted

Number of Distances = 3

Process converged in 3 iterations - A posteriori Sigma zero: 0.116559

Computed Chi Squared: 1.74838

Degrees of Freedom: 15

Strip # 1: E10

Camera Index = 1

Camera Name: CoolPix5700

Calibration Date: Oct 11, 2004

Focal Distance = 2593.872 pixel

Principal Point: (1280.007 , 960.032) pixel

No. Fiducial Marks: 4

Mark #1: ( 0.000, 0.000) pixel

Mark #2: (2560.000, 0.000) pixel

Mark #3: ( 0.000,1920.000) pixel

Mark #4: (2560.000,1920.000) pixel

K0 = 0

K1 = -1.795e-008

K2 = -7.086e-015

K3 = 3.167e-021

P1 = -9.038e-008

P2 = -3.121e-007

Number of Weighted Photos: 1

E10\_DSCN0122 Strip: E10 Weighted: X Y Z Omega Phi Kappa

Obs. Coord: (27.235 , 17.219 , 1.050)

Coord SDev: (1.000 , 3.000 , 1.000)

CP Res: (0.016 , -0.211 , 0.001)

Obs. Ang (Deg): (-0.044 , -1.055 , -0.203)

Ang SDev (Deg): (1.000 , 1.000 , 1.000)

Res: (-0.033 , -0.027 , 0.004)

E10\_DSCN0122 Strip: E10 Weighted: X Y Z Omega Phi Kappa

CP Adjust Coord: (27.251 , 17.008 , 1.051)

Adjusted Angles (deg): Ome: -0.077 Phi: -1.082 Kap: -0.199

Number of Points = 12

D122M1.1 - SDev: (0.750,0.750) - Adj: ( 550.897,1136.599) - Res: ( 0.000,-0.000)

D122M1.2 - SDev: (0.750,0.750) - Adj: ( 737.965,1132.849) - Res: ( 0.000,-0.000)

D122M1.3 - SDev: (0.750,0.750) - Adj: ( 930.055,1131.387) - Res: ( 0.000,-0.000)

D122M1.4 - SDev: (0.750,0.750) - Adj: (1119.908,1131.176) - Res: ( 0.000,-0.000)

D122M1.5 - SDev: (0.750,0.750) - Adj: (1313.286,1131.170) - Res: (-0.000,-0.000)

D122M1.6 - SDev: (0.750,0.750) - Adj: (1504.793,1133.368) - Res: (-0.000,-0.000)



F18e - SDev: (0.750,0.750) - Adj: ( 350.496, 819.634) - Res: (-0.121, 0.040)  
 F16e - SDev: (0.750,0.750) - Adj: ( 457.083, 820.891) - Res: ( 0.136,-0.163)  
 F0 - SDev: (0.750,0.750) - Adj: (1333.175, 828.869) - Res: ( 0.077, 0.228)  
 F6d - SDev: (0.750,0.750) - Adj: (1664.254, 830.458) - Res: (-0.175,-0.027)  
 F16d - SDev: (0.750,0.750) - Adj: (2217.539, 832.337) - Res: ( 0.223, 0.142)  
 F18d - SDev: (0.750,0.750) - Adj: (2327.933, 833.602) - Res: (-0.140,-0.221)

#### Number of Weighted Points: 12

D122M1.1 - Wt: Z - Obs: ( ---- , ---- , -61.310) - SDev: ( ---- , ---- , 0.030) Res: (--, --, 0.000)  
 D122M1.2 - Wt: Z - Obs: ( ---- , ---- , -61.116) - SDev: ( ---- , ---- , 0.030) Res: (--, --, 0.000)  
 D122M1.3 - Wt: Z - Obs: ( ---- , ---- , -60.916) - SDev: ( ---- , ---- , 0.030) Res: (--, --, 0.000)  
 D122M1.4 - Wt: Z - Obs: ( ---- , ---- , -60.730) - SDev: ( ---- , ---- , 0.030) Res: (--, --, 0.000)  
 D122M1.5 - Wt: Z - Obs: ( ---- , ---- , -60.518) - SDev: ( ---- , ---- , 0.030) Res: (--, --, 0.000)  
 D122M1.6 - Wt: Z - Obs: ( ---- , ---- , -60.331) - SDev: ( ---- , ---- , 0.030) Res: (--, --, 0.000)  
 F18e - Wt: XYZ - Obs: (6.805 , 13.745 , -59.549) - SDev: (0.030 , 0.030 , 0.030) Res: (-0.001, -0.003, -0.003)  
 F16e - Wt: XYZ - Obs: (9.305 , 13.756 , -59.424) - SDev: (0.030 , 0.030 , 0.030) Res: (-0.003, 0.011, 0.002)  
 F0 - Wt: XYZ - Obs: (29.606 , 13.907 , -58.863) - SDev: (0.030 , 0.030 , 0.030) Res: (-0.005, -0.016, 0.001)  
 F6d - Wt: XYZ - Obs: (37.232 , 13.904 , -58.636) - SDev: (0.030 , 0.030 , 0.030) Res: (0.005, 0.002, 0.002)  
 F16d - Wt: XYZ - Obs: (49.958 , 13.922 , -58.252) - SDev: (0.030 , 0.030 , 0.030) Res: (-0.005, -0.010, -0.005)  
 F18d - Wt: XYZ - Obs: (52.496 , 13.916 , -58.236) - SDev: (0.030 , 0.030 , 0.030) Res: (0.009, 0.015, 0.003)

Weighted Points RMSE: 0.005 0.011 0.002

#### Adjusted Point Coordinates

D122M1.1 - Wt: Z - (11.002,21.207,-61.310)  
 D122M1.2 - Wt: Z - (15.495,21.095,-61.116)  
 D122M1.3 - Wt: Z - (20.094,21.037,-60.916)  
 D122M1.4 - Wt: Z - (24.621,21.010,-60.730)  
 D122M1.5 - Wt: Z - (29.218,20.986,-60.518)  
 D122M1.6 - Wt: Z - (33.753,21.015,-60.331)  
 F18e - Wt: XYZ - (6.804,13.742,-59.552)  
 F16e - Wt: XYZ - (9.302,13.767,-59.422)  
 F0 - Wt: XYZ - (29.601,13.891,-58.862)  
 F6d - Wt: XYZ - (37.237,13.906,-58.634)  
 F16d - Wt: XYZ - (49.953,13.912,-58.257)  
 F18d - Wt: XYZ - (52.505,13.931,-58.233)

#### Adjusted Distances

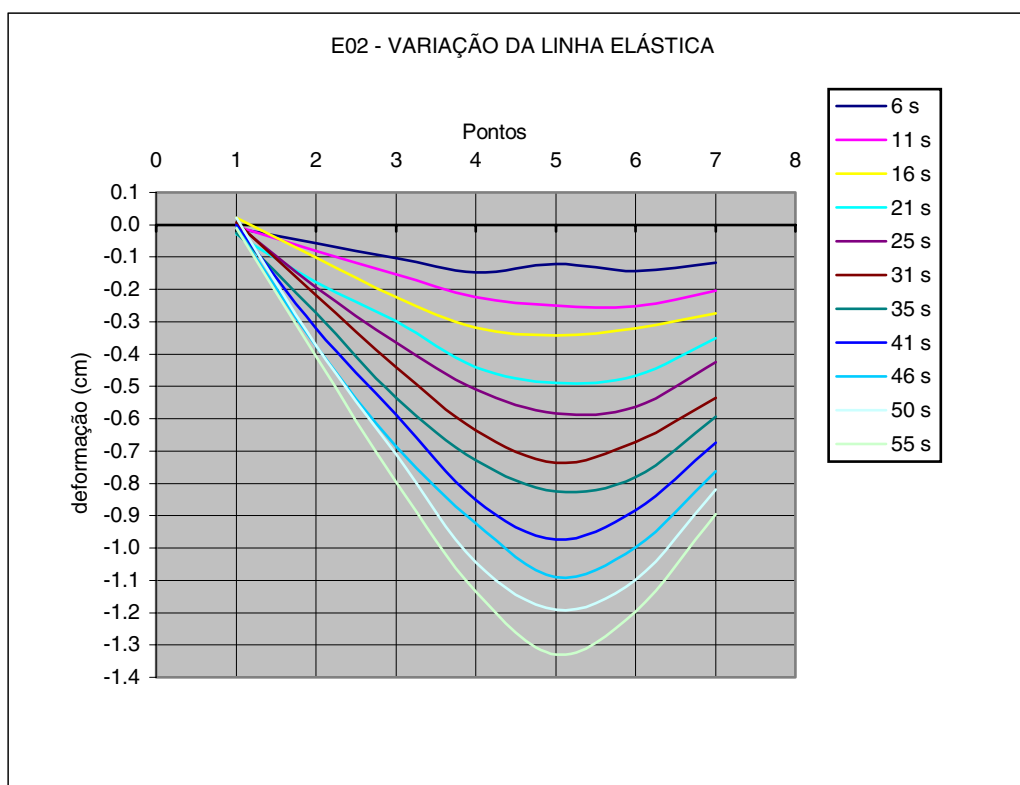
F18e - F18d	Adj Value: 45.721	Res: 0.001
F16e - F6d	Adj Value: 27.947	Res: 0.007
F18e - F16d	Adj Value: 43.169	Res: -0.011

TABELA 7 – RESULTADO DO PROCESSAMENTO DA FOTO 49 DO ENSAIO E04

COORDENADAS DOS ALVOS			
10:11:25			
PONTO	X	Y	Z
D49M2.9	11.085	21.105	-61.310
D49M2.8	15.619	21.141	-61.116
D49M2.7	20.231	21.159	-60.916
D49M2.6	24.842	21.111	-60.73
D49M2.5	29.186	21.161	-60.518
D49M2.4	33.963	21.122	-60.331
D49M2.3	38.333	21.064	-60.116
F18e	6.807	13.739	-59.554
F16e	9.297	13.768	-59.420
F0	29.601	13.898	-58.863
F6d	37.234	13.903	-58.634
F16d	49.957	13.919	-58.256
F18d	52.506	13.923	-58.233

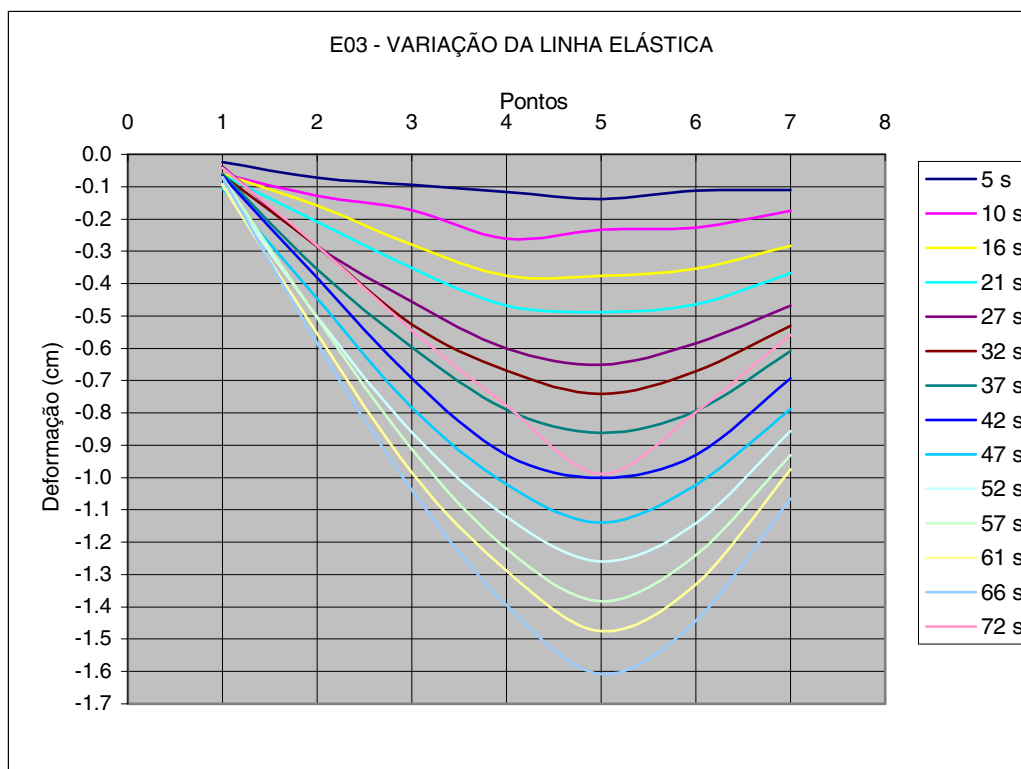
As figuras seguintes têm a numeração igual ao do ensaio, ou seja, de E02 até E12. O gráfico E01 está no corpo da tese. Para cada experiência, está representada a variação da linha elástica com o tempo. A cor da curva está associada com o instante da tomada da imagem.

FIGURA E02 – GRÁFICO DA VARIAÇÃO TEMPORAL DA LINHA ELÁSTICA



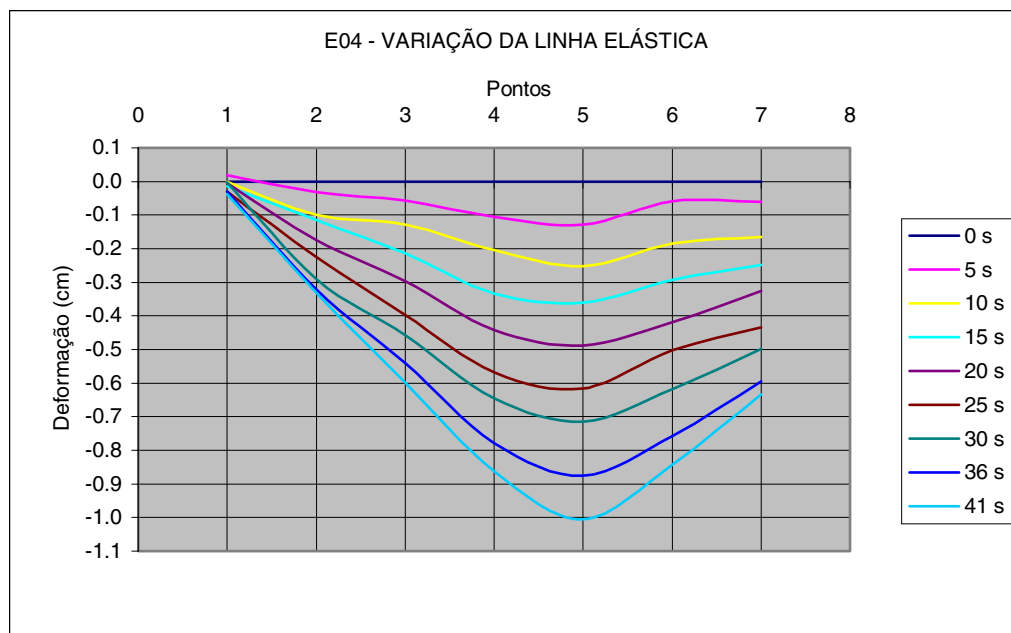
FONTE: O AUTOR (2005)

FIGURA E03 – GRÁFICO DA VARIAÇÃO TEMPORAL DA LINHA ELÁSTICA



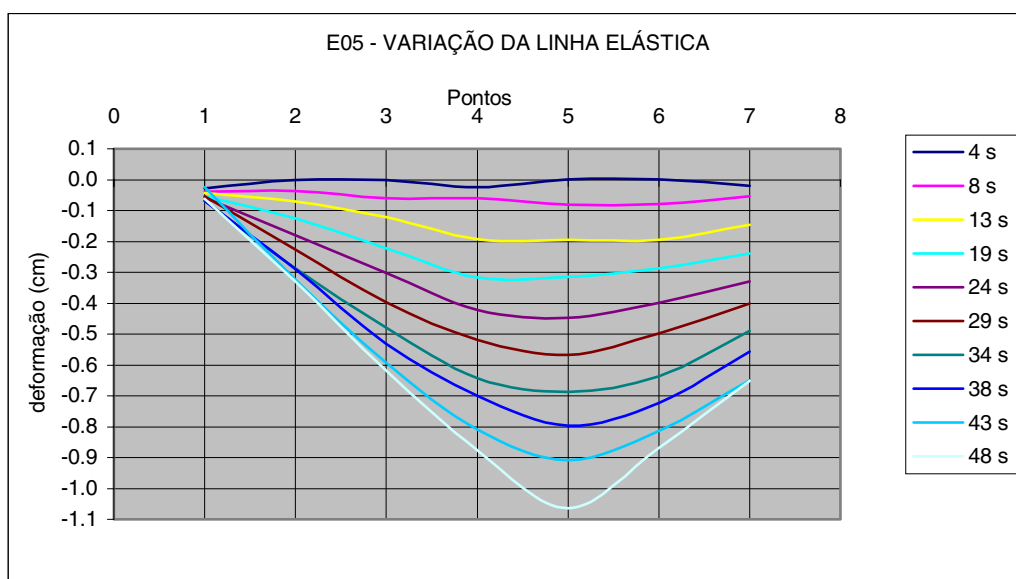
FONTE: O AUTOR (2005)

FIGURA E04 – GRÁFICO DA VARIAÇÃO TEMPORAL DA LINHA ELÁSTICA



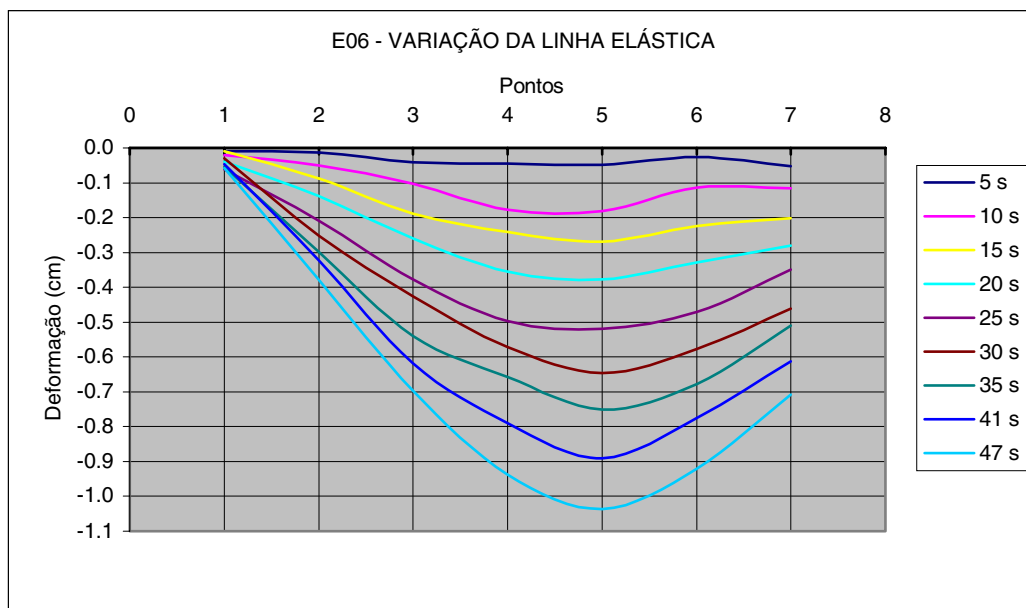
FONTE: O AUTOR (2005)

FIGURA E05 – GRÁFICO DA VARIAÇÃO TEMPORAL DA LINHA ELÁSTICA



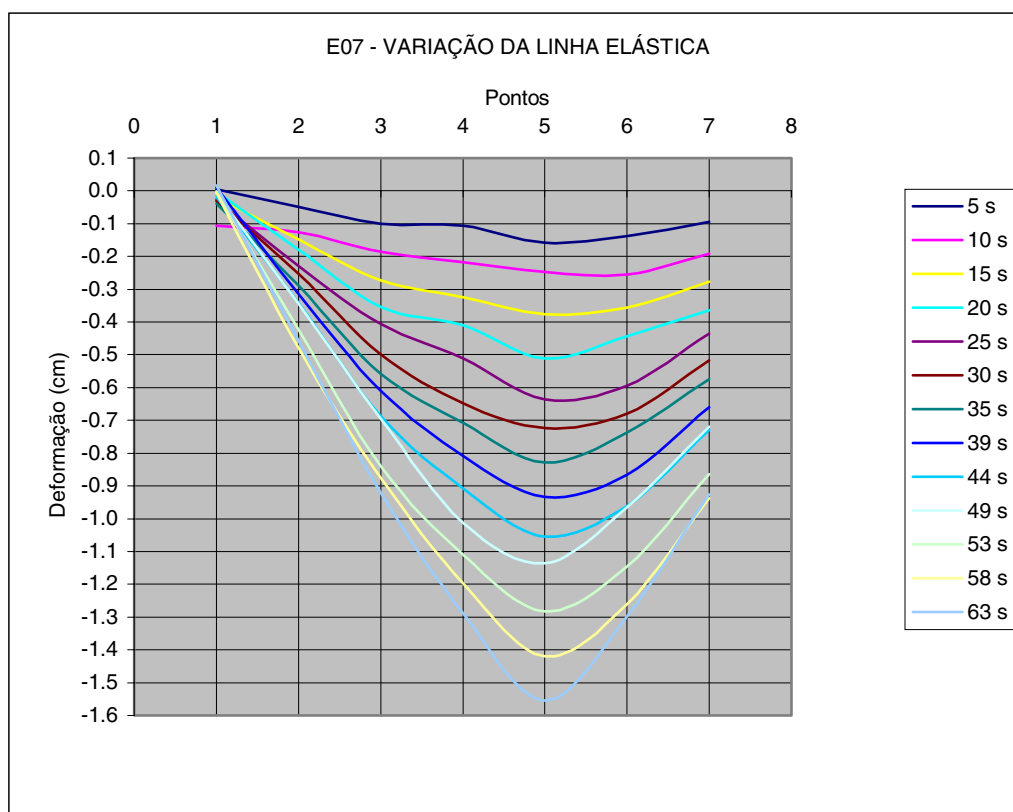
FONTE: O AUTOR (2005)

FIGURA E06 – GRÁFICO DA VARIAÇÃO TEMPORAL DA LINHA ELÁSTICA



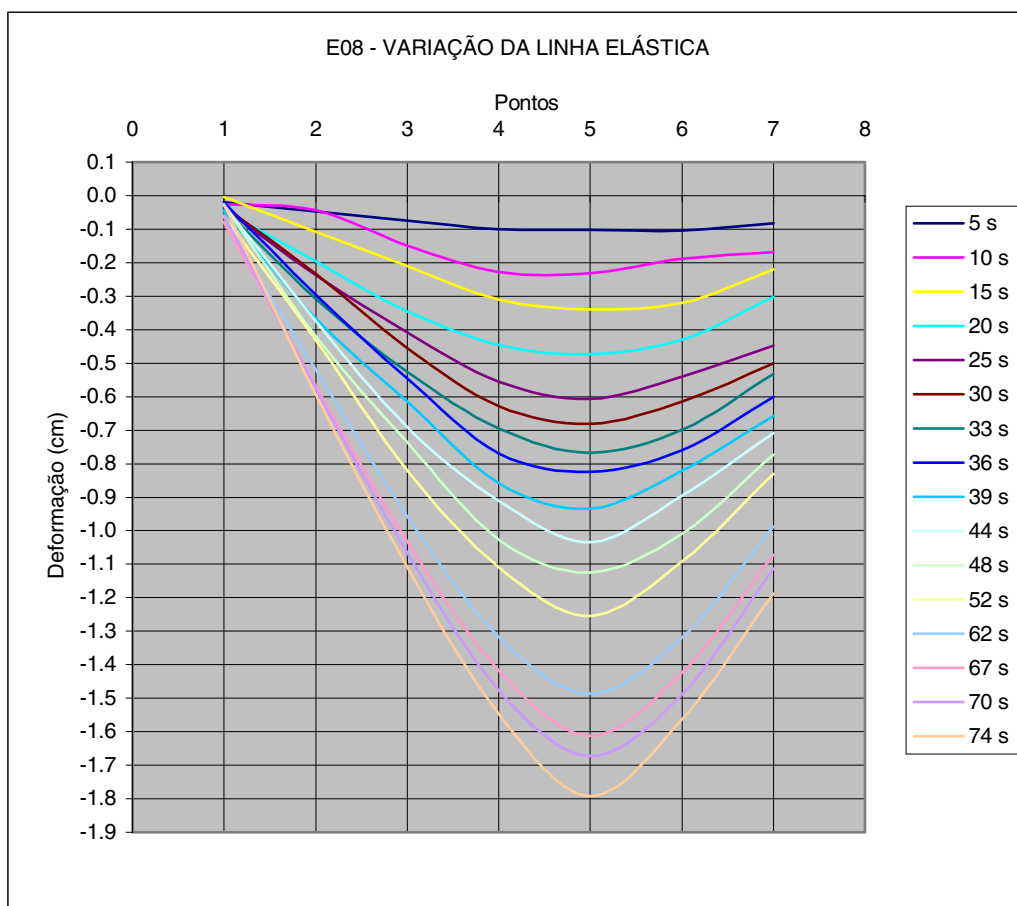
FONTE: O AUTOR (2005)

FIGURA E07 – GRÁFICO DA VARIAÇÃO TEMPORAL DA LINHA ELÁSTICA



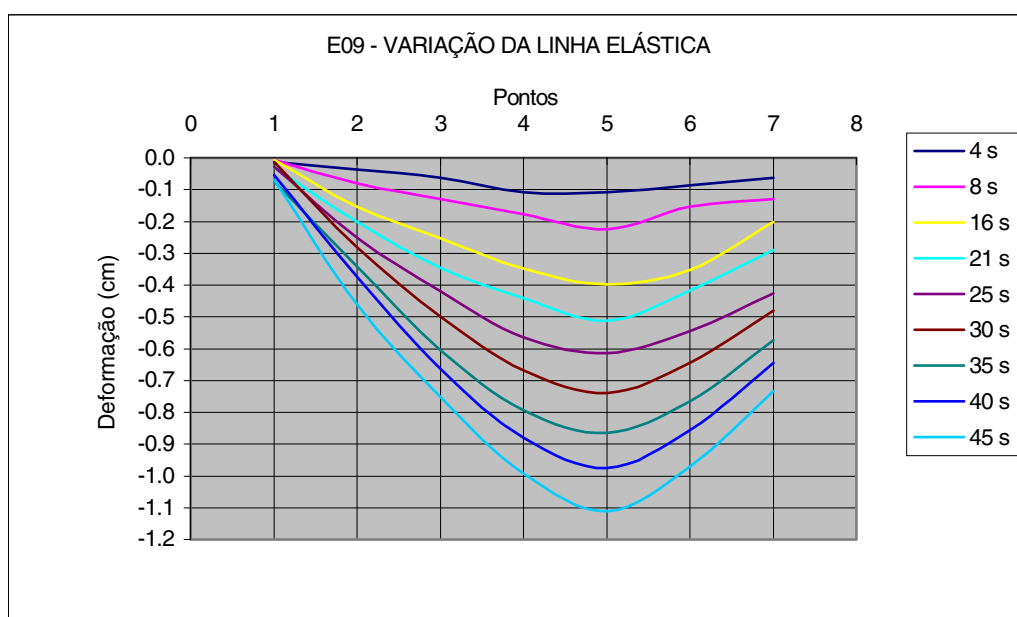
FONTE: O AUTOR (2005)

GRÁFICO E08 – VARIAÇÃO TEMPORAL DA LINHA ELÁSTICA



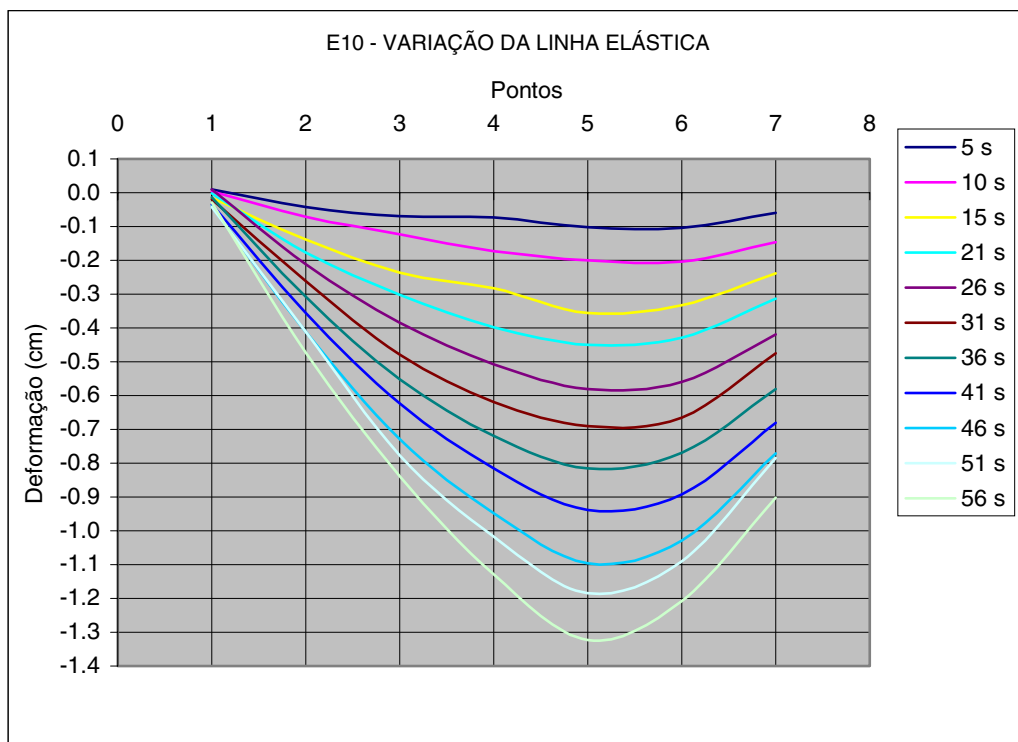
FONTE: O AUTOR (2005)

FIGURA E09 – GRÁFICO DA VARIAÇÃO TEMPORAL DA LINHA ELÁSTICA



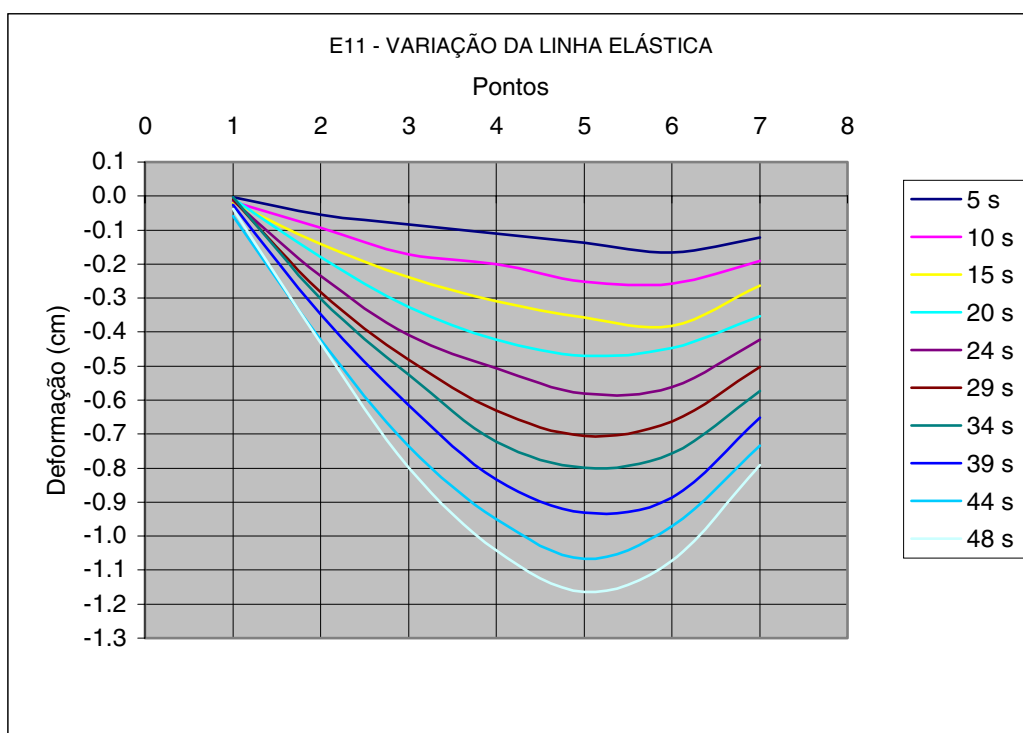
FONTE: O AUTOR (2005)

FIGURA E10 – GRÁFICO DA VARIAÇÃO TEMPORAL DA LINHA ELÁSTICA



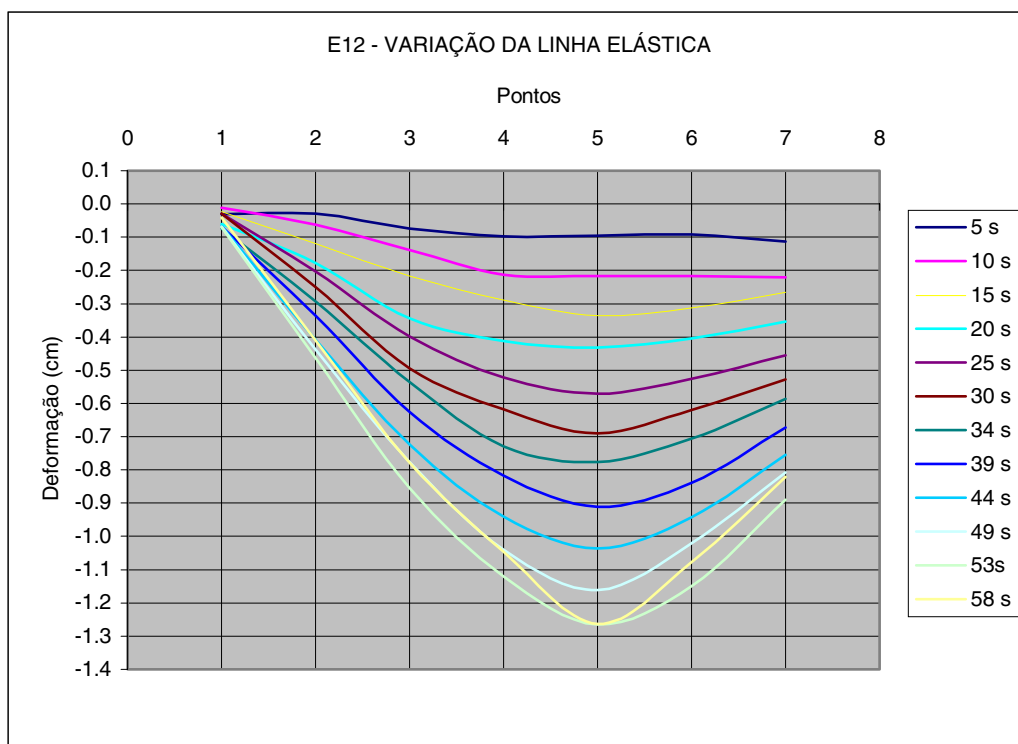
FONTE: O AUTOR (2005)

FIGURA E11 – GRÁFICO DA VARIAÇÃO TEMPORAL DA LINHA ELÁSTICA



FONTE : O AUTOR (2005)

FIGURA E12 – GRÁFICO DA VARIAÇÃO TEMPORAL DA LINHA ELÁSTICA



FONTE: O AUTOR (2005)